



Système karstique des Cent Fonts Simulation de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource

Rapport final

BRGM/RP-54865-FR

Septembre 2006



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Système karstique des Cent Fonts Simulation de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource

Rapport final

BRGM/RP-54865-FR

Septembre 2006

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche EAUR15
COMPLEX'AQUI du BRGM

B. Ladouche, J-Ch. Maréchal, N.Dörfliger, P.Lachassagne

Avec la collaboration de

M. Bakalowicz, M-J. Olivier, D. Martin, C. Bou et V. Prié

Vérificateur :

Nom : Pinault J-Louis

Date : 12 septembre 2006

Signature :

(Original signé par)

Approbateur :

Nom : Pennequin Didier

Date : 15 septembre 2006

Signature :

(Original signé par)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Cent Fonts, Hérault, pompage d'essai, système karstique, modèle, ressource, gestion

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

B.Ladouche, J.-Ch. Maréchal, N.Dörfliger, P. Lachassagne (2006) - Système karstique des Cent Fonts. Simulation de Scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource, BRGM/RP-54865-FR, 275 p., 59 ill., 32 tab., 8 ann..

Synthèse

L'augmentation démographique à laquelle est soumis le département de l'Hérault conduit à la prévision, à l'horizon 2015, d'un déficit important en eau potable. Compte tenu de ces perspectives, le Conseil Général de l'Hérault s'est investi dans une politique active de prévision des besoins et de développement de nouvelles ressources en eau. C'est dans ce cadre que le Conseil Général s'est appuyé sur les recommandations du SDAGE RM&C (1996) qui préconisaient, notamment, de développer les connaissances sur les eaux souterraines, de réserver cette ressource aux usages nobles et d'accroître le recours à la ressource en eau des aquifères karstiques, encore sous-exploités à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée et Corse. Le SDAGE identifiait aussi les aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault comme des aquifères d'importance patrimoniale, à « étudier en priorité ».

Pour mener à bien ce projet de caractérisation de la ressource en eau des systèmes aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault, dont le système karstique des Cent Fonts, le Conseil Général de l'Hérault a notamment sollicité l'assistance scientifique et technique du BRGM, du CNRS et de l'université de Lyon 1. Ce programme s'inscrit au sein de l'axe thématique consacré aux aquifères karstiques du projet de recherche cadre du BRGM relatif aux aquifères complexes (COMPLEX'AQUI – EAUR15).

Les études se sont déroulées en 3 phases successives depuis 1996. Les premières phases ont permis notamment l'identification et la caractérisation de la structure et du fonctionnement des deux principaux aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault, émergeant respectivement aux sources des Fontanilles et des Cent Fonts, et la focalisation des recherches sur le plus prometteur des deux en terme de ressource en eau, celui des Cent Fonts (Commune de Causse de la Selle, Hérault). La phase 3 du projet a été mise en œuvre sur la période 2003-2006 ; elle comprend notamment des pompages d'essai sur le principal point d'accès à l'aquifère karstique, le drain qui aboutit à la source des Cent Fonts, effectués durant l'été 2005. Cette phase a fait l'objet d'un rapport spécifique de fin de travaux de forage et d'interprétation des pompages d'essai (BRGM/RP-54426-FR) délivré en décembre 2005. La quatrième phase, dite d'évaluation, concerne la détermination des conditions d'exploitabilité du système karstique, ainsi que la synthèse des connaissances sur le système dont les conclusions font l'objet du présent rapport.

Les objectifs de ce rapport sont de proposer des scénarios d'exploitation de la ressource en eau du système karstique des Cent Fonts, en considérant les besoins en eau ainsi que le débit à restituer à l'Hérault et les limites hydrogéologiques déterminées à partir des modèles de simulation calés expérimentalement. 30 scénarios ont été établis, sur la base de discussions menées avec le Conseil Général pour évaluer les besoins en eau (augmentation graduelle de la consommation de mai à septembre et périodes de pointe du 14 juillet au 15 août) ; quatre débits de base pour l'AEP ont été considérés : 100 l/s, 125 l/s, 150 l/s et 200 l/s. 320 simulations ont été

effectuées à partir du comportement du système sous sollicitation (pompage), à l'aide de deux types de modèles de simulation numérique, en considérant 30 cycles hydrologiques différents couvrant la période de simulation 2006-2016. Les périodes hydrologiques de ces 30 années ont été caractérisées en utilisant un processus stochastique faisant intervenir 500 tirages aléatoires de pluies et d'ETP à partir des chroniques s'étalant de 1995 à 2005, au sein d'un modèle « pluies-débits ». Les chroniques de débits ont été analysées en termes de probabilité d'occurrence.

Les résultats détaillés du suivi hydrobiologique de la faune stygobie sont également présentés au sein de ce rapport. Le suivi hydrobiologique de la faune stygobie effectué par l'UMR CNRS 5023 Ecologie de Hydrosystèmes Fluviaux de l'Université Claude Bernard, Lyon I a permis de confirmer la diversité faunistique locale, avec un total de 36 espèces stygobies recensées, dont près de 20 nouvelles appartenant essentiellement aux groupes des Amphipodes, des Ostracodes et des Mollusques. La présence de faunes non stygobies permet de confirmer la contribution des eaux de l'Hérault lors des pompages à partir du moment où les sources tarissent. Aucune faune planctonique ou de larves d'insectes n'a été déterminée qui aurait pu attester de l'influence d'une source faunistique exogène régulière, qui proviendrait notamment des infiltrations de la Buèges. Le nombre d'organismes stygobies extraits du massif karstique lors du pompage en été 2005, est près de deux fois le nombre d'individus extraits de manière naturelle du karst en période d'eaux moyennes. Cependant, en toute relativité, il est nécessaire de garder à l'esprit qu'un système karstique en conditions naturelles à l'échelle de l'ensemble des crues d'un cycle hydrologique évacue plusieurs millions d'individus par année. De plus, l'inventaire effectué a permis de collecter plus d'organismes en conditions post-pompage que pré-pompage ; ceci semble donc indiquer que le pompage n'aurait pas eu un impact notable sur les communautés stygobies. Les effets de l'abaissement durable du niveau piézométrique sur les communautés stygobies n'ont pas pu être mesurés ; il n'est pas possible ainsi d'appréhender l'impact d'un abaissement de niveau d'eau provoquant des exondations au niveau du massif karstique. L'abaissement durable du niveau d'eau pourrait être à l'origine de destruction temporaire importante de la surface et du volume des habitats nécessaire au développement normal des organismes. Seuls des suivis à long terme, notamment de crues, permettraient de savoir si la structure du karst a ménagé des refuges suffisamment efficaces pour assurer la résilience des communautés et le maintien des espèces du système karstique des Cent Fonts.

Des perspectives en termes d'exploitabilité du système karstique des Cent Fonts peuvent être formulées en prenant en considération les résultats de différents scénarios pour des conditions hydrologiques distinctes. Ces différents scénarios intègrent des débits à restituer au fleuve Hérault compris, au minimum, entre 200 et 300 l/s ainsi que des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable. Considérant une probabilité d'occurrence de conditions hydrologiques de plus de 30 ans « sec », le système pourrait être exploité avec un ouvrage nécessitant d'être approfondi par sécurité, à un débit total de pompage en période de pointe de 400 l/s. Dans ce type de contexte hydrologique très déficitaire, le débit exploité pour l'AEP pourrait donc atteindre 200 l/s en périodes de pointe en été, le débit à restituer à l'Hérault serait de 200 l/s. Le volume annuel pompé pour ce scénario serait ainsi de 5.3 millions de m³.

Pour des contextes hydrologiques de probabilité d'occurrence comprise entre 20 ans sec et 30 ans sec, le débit exploité pour l'AEP pourrait atteindre 250 l/s en périodes de pointe en été, pour un débit à restituer à l'Hérault de 200 l/s (débit total de pompage en période de pointe de 450 l/s). Pour un débit à restituer au fleuve Hérault supérieur (250 l/s), le débit d'exploitation pour l'alimentation en eau potable ne pourrait excéder 200 l/s en période de pointe.

Au terme de ce projet pluri annuel, une synthèse de l'état des connaissances de la structure et du fonctionnement du système karstique est proposé (chapitre 8).

Sommaire

1. Introduction	17
1.1. RAPPEL DU CONTEXTE DU PROJET	17
1.2. DEROULEMENT DU PROJET	17
1.3. RAPPEL DES OBJECTIFS DES ESSAIS DE POMPAGE	18
1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT	19
2. Présentation des scénarios d'exploitation du système des Cent Fonts	21
2.1. DESCRIPTION QUALITATIVE DU FONCTIONNEMENT DU KARST DES CENT FONTS SOUMIS A UN POMPAGE	21
2.1.1. Rappel du fonctionnement du système karstique en régime non influencé .	21
2.1.2. Fonctionnement du système karstique des Cent Fonts sollicité par pompage.....	22
2.2. CARACTERISTIQUES DE LA CHRONIQUE DE PRELEVEMENT POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (AEP)	23
2.3. CARACTERISTIQUES DE LA CHRONIQUE DE POMPAGE.....	25
3. Présentation des modèles de simulation	29
3.1. DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE MODELISATION A L'AIDE DU LOGICIEL TEMPO.	29
3.1.1. Principe général de l'approche de modélisation Tempo.....	29
3.1.2. Structure du modèle Tempo	30
a) Description du modèle « niveau piézométrique » à la source des Cent Fonts	30
b) Description et présentation des fonctions caractéristiques du sous modèle « Débit Naturel de la source des Cent Fonts ».	33
c) Description et présentation des fonctions caractéristiques du sous modèle «débit des pertes de la Buèges ».....	37
3.1.3. Description du modèle de transfert « piézométrie des Cent Fonts »	39
a) Objectif.....	39
b) Générateur de pluie de Tempo.....	39

c) Générateur d'ETP de Tempo	45
d) Période de calibration des modèles	50
e) Période de prévision des modèles de transfert en mode prévisionnel	50
3.1.4. Commentaire des résultats obtenus au moyen des modèles de transfert de débit en mode prévisionnel	50
3.2. DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE MODELISATION A L'AIDE DU MODELE DE RESERVOIR COUPLE A UNE SOLUTION ANALYTIQUE (MODELE PRESENTE DANS LE RAPPORT BRGM/RP-54426-FR)	55
3.2.1. Rappel du principe du modèle	55
3.2.2. Description du modèle	55
3.2.3. Modifications apportées au modèle	57
a) Vidange naturelle du système karstique	57
b) Tarage du débit de la source	58
c) Relation système karstique – rivière Hérault	59
d) Pas de temps	59
3.2.4. Fonctionnement hydraulique des réservoirs	59
a) Hydraulique du réservoir « drain karstique »	59
b) Hydraulique du réservoir « blocs »	62
3.3. PRESENTATION DES RESULTATS DES CALAGES DES MODELES UTILISES	64
3.3.1. Résultats du calage du modèle « niveau piézométrique » de Tempo	64
a) Caractérisation des réponses impulsionnelles	64
b) Contribution relative des composantes du modèle	66
c) Critique des résultats du modèle et interprétation	67
3.3.2. Résultats du calage du modèle de réservoir couplé à une solution analytique	71
a) Paramètres du modèle	71
b) Résultats	73
4. Présentation et discussion des résultats de l'intercomparaison des deux approches de simulation	79

4.1. INTERCOMPARAISON DES RESULTATS DES MODELES EN CONSIDERANT UNE CHRONIQUE DE POMPAGE IDENTIQUE A CELLE DU POMPAGE D'ESSAI DE LONGUE DUREE DE L'ETE 2005	79
4.1.1. Objectif	79
4.1.2. Données d'entrée utilisées	79
4.1.3. Inter-comparaison des résultats	80
5. Simulation de scénarios d'exploitation de l'aquifère des Cent Fonts	83
5.1. DONNEES D'ENTREE CONSIDEREES	83
5.2. SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS AU MOYEN DU MODELE PIEZOMETRIQUE DE TEMPO	88
5.3. INTER-COMPARAISON DES RESULTATS DES MODELES.....	100
6. Exploitabilité de la ressource du système karstique des Cent Fonts	109
6.1. EXPLOITABILITE DU SYSTEME KARSTIQUE A PARTIR DE L'INTEPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE ET DES RESULTATS DE SCENARIOS DE GESTION.....	109
6.1.1. Exploitabilité du système karstique des Cent Fonts et impact quantitatif sur le débit de l'Hérault.....	110
6.1.2. Exploitabilité du système karstique des Cent Fonts à partir des résultats du modèle TEMPO	113
6.1.3. Exploitabilité du système karstique des Cent Fonts à partir des résultats du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink	120
6.2. INTER-COMPARAISON DES RESULTATS	126
7. Interprétation du suivi hydrobiologique de la faune stygobie réalisé sur le système karstique des Cent Fonts	127
7.1. INTRODUCTION	127
7.2. EFFETS D'UN POMPAGE SUR LES COMMUNAUTES STYGOBIONTES	128
7.3. CARACTERISTIQUES DES ESPECES STYGOBIES	129
7.4. PROTOCOLE DE SUIVI ET METHODOLOGIE DES PRELEVEMENTS ET DES INVENTAIRES.....	130
7.5. RESULTATS.....	132
7.5.1. Inventaire général des espèces stygobies récoltées aux Cent Fonts.....	132
7.5.2. Faune extraite lors des pompages	135
7.5.3. Inventaire comparatif PRE / POST pompage	136

a) Inventaire au niveau des sources et de la cavité avant et après pompage	136
b) Suivi de crue post-pompage au niveau de la source	138
7.6. DISCUSSION / INTERPRETATION.....	139
7.6.1. Crue /pompage ou dérive naturelle des organismes versus dérive artificielle	139
7.6.2. Contamination par les eaux de surface.....	140
7.6.3. Exondation du massif.....	140
7.7. RECOMMANDATIONS, PERSPECTIVES	140
8. Conclusions et perspectives.....	143
8.1. ETAT DE LA CONNAISSANCE DU SYSTEME KARSTIQUE DES CENT FONTS	143
8.2. IMPACTS D'UN POMPAGE SUR LA FAUNE STYGOBIE	144
8.3. PERSPECTIVES EN TERME D'EXPLOITABILITE DU SYSTEME KARSTIQUE DES CENT FONTS	146
9. Références bibliographiques	149

Liste des illustrations

Illustration 1 - synotypique présentant les variables qui influencent la piézométrie du drain karstique des Cent Fonts.....	22
Illustration 2 - Chronique de facteur de pompage déduit de l'analyse des consommations en eau potable sur le secteur par le Conseil Général de l'Hérault	24
Illustration 3 - Chroniques de pompage pour l'alimentation en eau potable (AEP) utilisées dans le cadre de la présente étude	25
Illustration 4 - Evolutions temporelles des débits (naturel et résiduel) de la source des Cent Fonts et du débit réservé lors d'un pompage (paramètre de l'exemple : contexte hydrologique trentenal sec, base AEP = 100 l/s, débit réservé = 300 l/s).....	27
Illustration 5 - Evolutions temporelles des débits de pompage AEP, du débit supplémentaire à pomper pour satisfaire les conditions de débit réservé et du débit total de pompage (QAEP+Q sup). La sollicitation des réserves du karst se produit lorsque le débit total de pompage est supérieur au débit naturel qu'aurait présenté le système en absence de pompage. Lorsque le débit de sollicitation devient <0, les sources tarissent, le système est alors alimenté par un flux d'eau en provenance de l'Hérault (Q =30 l/s).	

Paramètres de l'exemple : contexte hydrologique trentenal sec, base AEP = 100 l/s, débit réservé = 300 l/s.....	28
Illustration 6 - schéma de principe du modèle de transfert Cent Fonts « piézométrie »	32
Illustration 7 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés (réponses impulsionnelles) de la source des Cent Fonts (réponses impulsionnelles globales du système).....	34
Illustration 8 - Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie.....	35
Illustration 9 - Comparaison du débit modélisé au débit mesuré à la source des Cent Fonts : (85 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.76).	36
Illustration 10 - Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP.	36
Illustration 11 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés (réponses impulsionnelles) de pertes de la Buèges.	37
Illustration 12 - Comparaison du débit modélisé au débit mesuré au pertes de la Buèges: (81 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.61.	38
Illustration 13 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et des lois Log-Normale et Gumbel de la chronique de pluie de l'impluvium karstique des Cent Fonts.	41
Illustration 14 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : histogramme de la distribution mensuelle de la pluie déduit des observations et de la simulation.	41
Illustration 15 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : corrélogramme de la pluie déduit des observations et des simulations.	42
Illustration 16 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts: représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations.	42
Illustration 17 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques de la série observée : Exemple du run 3	44
Illustration 18 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de l'ETP journalière (Données Météo France, station Montpellier Fréjorgues), de l'ETP moyenne mensuelle, de l'écart-type et du bruit (fonction aléatoire).	46
Illustration 19 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : corrélogramme de l'ETP déduit des observations et des simulations et corrélogramme croisé ETP – Pluie déduit des observations et des simulations	47
Illustration 20 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : écart-type mensuel du bruit de l'ETP déduit des observations et des simulations.	47
Illustration 21 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations.	48
Illustration 22 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et de la loi Normale.....	48
Illustration 23 - Générateur d'ETP et de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence d'ETP et de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques des séries observées : Exemple du run 3	49

Illustration 24 - modèle de transfert des débits des Cent Fonts en mode prévisionnel : Représentation des débits de la sources pour différentes probabilités d'occurrence (échelle semi- logarithmique)	53
Illustration 25 - schéma de fonctionnement du système karstique des Cent Fonts au cours de la période de pompage	56
Illustration 26 - schématisation du modèle mathématique. H_b : charge hydraulique dans les blocs ; H_d : charge hydraulique dans le drain	57
Illustration 27 - débit d'infiltration de l'Hérault en fonction du niveau dans le drain	59
Illustration 28 - paramètres du réservoir « drain karstique »	61
Illustration 29 - paramètres du réservoir « blocs »	63
Illustration 30 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés (réponses impulsionnelles) du modèle piézométrique de Tempo (cf. illustration 6)	64
Illustration 31 - Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée aux Cent Fonts (pas de temps journalier, 98 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.95).	65
Illustration 32 - Evolution temporelle des contributions relatives du modèle piézométrique de Tempo (cf. illustration 6)	66
Illustration 33 - Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée aux Cent Fonts (période du 01/07/05 au 31/10/05, pas de temps journalier, 98 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.95).	67
Illustration 34 - Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée aux Cent Fonts (pas de temps journalier, 98 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.95).	68
Illustration 35 - Evolution de la turbidité des eaux au forage CGE (09635X0003) sur la période du 01/07/05 au 15/12/05 (pas de temps de 20 mn)	70
Illustration 36 - Evolution de la turbidité des eaux au forage CGE (09635X0003) depuis le début des suivis (octobre 2003, pas de temps de 20 mn).....	71
Illustration 37 - paramètres du nouveau modèle (en gris, paramètres d'ajustement).....	72
Illustration 38 - schéma du karst et des paramètres utilisés pour le calage du modèle.....	73
Illustration 39 - comparaison des niveaux d'eau simulés et observés au forage F3 et dans le piézomètre F6 (modèle 3, pas de temps horaire).....	74
Illustration 40 - comparaison des débits observés et simulés à la source entre le 27 juillet et le 3 août 2005.....	75
Illustration 41 - Calcul, au sein des blocs, du rayon d'action et de la distance maximale (drain - limite hydraulique) d'une limite hydraulique visible au cours d'un pompage de durée t (valeurs données à titre indicatif étant donné les équivalences possibles sur les caractéristiques hydrodynamiques des blocs)	75
Illustration 42 - évolution des différents flux simulés en cours de pompage	76
Illustration 43 - Origine des volumes d'eau pompée lors du pompage d'essai de juillet- août 2005 à partir des résultats du modèle	77
Illustration 44 - répartition des volumes écoulés lors du pompage d'essai de juillet-août 2005.....	78

Illustration 45 - Evolution temporelle de la piézométrie simulée par les deux modèles (données d'entrées du Run 1, chronique de pompage identique à 2005 : du 01 août au 6 septembre)	81
Illustration 46 - intercomparaison des résultats des modèles lors des périodes de pompage (données d'entrées du Run 1, chronique de pompage identique à 2005 : du 01 août au 6 septembre)	82
Illustration 47 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par le modèle Piézométrique de Tempo en contexte hydrologique d'année fortement déficitaire : probabilité d'occurrence de type « 30 ans sec » (Scénario : $Q_{réservé} = 200$ l/s, $Q_{base\ AEP} = 100$ l/s). Les évolutions des composantes (Q_{AEP} , $Q_{supplémentaire}$) de la fonction de pompage, de la fonction de sollicitation des réserves du karst, du débit naturel de la source qu'aurait présenté les Cent Fonts (QCF naturel) en absence de pompage sont également reportées ainsi que le débit de contribution en provenance de l'Hérault, le débit résiduel des Cent Fonts et le débit réservé au fleuve Hérault.	90
Illustration 48 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par le modèle Piézométrique de Tempo en contexte hydrologique d'année fortement déficitaire : probabilité d'occurrence de type « >30 ans sec » (Scénario : $Q_{réservé} = 200$ l/s, $Q_{base\ AEP} = 100$ l/s).	91
Illustration 49 - Evolution des débits naturels de la source des Cent Fonts pour différents contextes hydroclimatiques et évolution temporelle de la différence d'écoulement engendrée par les pompes par rapport aux situations naturelles. Scénario : $Q_r = 200$ l/s, $Q_{b\ AEP} = 100$ l/s, données d'entrées du run 3.	92
Illustration 50 - Evolution de la différence d'écoulement engendrée par les pompes par rapport aux situations naturelles (différents contextes hydroclimatiques sont considérés). Scénario : $Q_r = 250$ l/s, $Q_{b\ AEP} = 100$ l/s, données d'entrées du run 3)	93
Illustration 51 - Evolution de la différence d'écoulement engendrée par les pompes par rapport aux situations naturelles (différents contextes hydroclimatiques sont considérés). Scénario : $Q_r = 250$ l/s, $Q_{b\ AEP} = 100$ l/s, données d'entrées du run 3)	94
Illustration 52 - Evolution de la piézométrie minimale de la semaine de pointe d'août calculée par le modèle Tempo en fonction du débit de sollicitation des réserves du karst (11 combinaisons d'entrée (Q_r , $Q_{b\ AEP}$) ont été considérées, chroniques d'entrées hydrologique du run 3).	95
Illustration 53 - Evolution de la piézométrie minimale de la semaine de pointe d'août calculée par le modèle Tempo en fonction du débit de pompage (11 combinaisons d'entrée (Q_r , $Q_{b\ AEP}$) ont été considérées, chroniques d'entrées hydrologique du run 3).	96
Illustration 54 - Evolution de la piézométrie minimum de la semaine de pointe d'août calculée par le modèle Tempo en fonction du débit de pompage (11 combinaisons d'entrée (Q_r , $Q_{b\ AEP}$) ont été considérées, chroniques d'entrées hydrologique du run 3).	97
Illustration 55 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique « Médian » (Scénario : $Q_{réservé} = 200$ l/s, $Q_{base\ AEP} = 100$ l/s). L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée	101
Illustration 56 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans sec, mois d'été » suivi d'une première crue tardive (début octobre) : Scénario : $Q_{réservé} = 200$ l/s, $Q_{base\ AEP} = 100$ l/s.	

L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée	102
Illustration 57 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 20 ans sec, mois d'été » suivi d'une première crue précocse (début septembre) : Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s). L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée	103
Illustration 58 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 30 ans sec, mois d'été » suivi d'une crue précocse (début septembre) : Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s. L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée	104
Illustration 59 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « >30 ans sec, mois d'été », suivi d'une crue tardive (début octobre) : Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s. L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée.....	105

Liste des tableaux

Tableau 1- Volume annuel et débits pour l'alimentation en eau potable et pour les semaines de pointe selon 4 scénarios	25
Tableau 2 - Pluviométrie moyenne, débit moyen des pertes de la Buèges et des Cent Fonts calculé pour les différents cycles hydrologiques modélisés.....	51
Tableau 3 - statistiques descriptives des débits (exprimés en l/s) des Cent Fonts pour les mois d'été en fonction de la probabilité d'occurrence	54
Tableau 4 - Paramètres des scénarios du run 1	85
Tableau 5 - Paramètres des scénarios du run 2	86
Tableau 6 - Paramètres des scénarios du run 3	87
Tableau 7 - Synthèse des résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel Tempo (5 contextes hydrologiques distincts sont considérées).....	98
Tableau 8 - Synthèse des résultats des simulations réalisées à l'aide du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink (5 contextes hydrologiques distincts sont considérés)	106
Tableau 9 - volume annuel exprimé en millions de m ³ selon les différents scénarios de conditions de débit pour l'AEP	109
Tableau 10 - Variation du débit de l'Hérault (QMNA5 quinquenal sec) estimé à l'aval des Cent Fonts dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer égal à 170 l/s lorsque les sources des Cent Fonts tarissent du fait de l'exploitation du système par pompage (dQ correspond à l'incertitude).	112
Tableau 11 - Variation de débit de l'Hérault estimé à l'aval des Cent Fonts (pour une année hydrologique « moyenne ») dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer égal à 170 l/s lorsque les sources des Cent Fonts tarissent du fait de l'exploitation du système par pompage (dQ correspond à l'incertitude).	112

Tableau 12 - Variation du débit de l'Hérault estimé à l'aval des Cent Fonts (pour une année hydrologique de sécheresse trentenal) dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer égal à 170 l/s lorsque les sources des Cent Fonts tarissent du fait de l'exploitation du système par pompage (dQ correspond à l'incertitude).....	113
Tableau 13 - Volume total pompé exprimé en millions de m ³ , pour les scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO.....	116
Tableau 14 - Volume annuel pompé et restitué en débit réservé (Q _r) résultant des simulations effectuées à l'aide de l'approche TEMPO pour les différents scénarios.....	117
Tableau 15 - Volume annuel sollicité au sein du système karstique des Cent Fonts (à partir du tarissement des sources) pour les différents scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO.....	118
Tableau 16 - Durée de sollicitation du système karstique des Cent Fonts pour les différents scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO.....	119
Tableau 17 - Volume total annuel pompé pour les scénarios simulés à l'aide du modèle développé sous Matlab/Simulink.	122
Tableau 18 - Volume annuel pompé et restitué en débit réservé (Q _r) pour les différents scénarios simulés à l'aide du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink.	123
Tableau 19 - Volume annuel de sollicitation du système karstique des Cent Fonts (lors du tarissement des sources) pour les différents scénarios simulés à l'aide du modèle numérique Matlab/Simulink.....	124
Tableau 20 - Durée de sollicitation du système karstique des Cent Fonts par pompage, résultant des scénarios simulés à l'aide du modèle numérique Matlab/Simulink.....	125
Tableau 21 - Suivi de l'impact du pompage sur les communautés de la faune cavernicole des Cent Fonts : protocole conventionnel avec le BRGM et le CG34.....	132
Tableau 22 - Chronologie de l'échantillonnage de la faune stygobie du massif des Cent Fonts	132
Tableau 23 - Inventaire général des stygobies du système karstique des Cent Fonts. Comparaison avec les données antérieures disponibles.	134
Tableau 24 - Comparaison des inventaires effectués avant et après les pompages expérimentaux au niveau des sources et de la cavité des Cent Fonts (données cumulées de tous les échantillons récoltés, présentées en abondance et en abondance relative).....	137
Tableau 25 - Inventaire post-pompage du suivi de crue (janvier 2006) comparé à l'inventaire post-pompage du massif (décembre 2005).....	138
Tableau 26 - Contexte hydrologique de la source des Cent Fonts lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 1).....	169
Tableau 27 - Contexte hydrologique de la source des Cent Fonts lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 2).....	170
Tableau 28 - Contexte hydrologique de la source des Cent Fonts lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 3).....	171
Tableau 29 - Contexte hydrologique de pertes de la Buèges lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 1).	172
Tableau 30 - Contexte hydrologique de pertes de la Buèges lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 2).	173

Tableau 31 - Contexte hydrologique de pertes de la Buèges lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 2).....	174
Tableau 32 - Débit de l'Hérault en amont des Cent Fonts déduit des suivis ponctuelles des niveaux d'eau (Mire) suivant les paramètres de la fonction mathématique de la Méthode A.	229

Liste des annexes

Annexe 1 Analyse des Courbes de recession de la source des Cent Fonts (période 1998-2005)	155
Annexe 2 Contextes hydrologiques des débits naturels des Cent Fonts et des pertes de la Buèges estimés par l'approche prévisionnelle à l'aide des sous modèles de transfert (calculs réalisés à partir des 3 chroniques de pluie : run 1, run 2 et run 3 générés par le modèle prévisionnel)	167
Annexe 3 Eléments d'informations complémentaires au modèle de réservoir couplé à une solution analytique	175
Annexe 4 Résultats de l'approche de modélisation Tempo et comparaison aux résultats du modèle de réservoir couplé à une solution analytique.....	181
Annexe 5 Eléments complémentaires de l'étude Hydrobiologique	207
Annexe 6 Présentation des résultats des suivis hydrologiques réalisés depuis septembre 2005 sur le système karstique des Cent Fonts	209
Annexe 7 Débit de l'Hérault.....	221
Annexe 8 Suivi hydrobiologique de la faune stygobie.....	233

1. Introduction

1.1. RAPPEL DU CONTEXTE DU PROJET

L'augmentation démographique à laquelle est soumis le département de l'Hérault conduit à la prévision, à l'horizon 2015 (cf. Schéma Départemental d'Alimentation en Eau Potable (AEP) du département), d'un déficit important en eau potable, au moins à l'échelle d'une partie du secteur Est du département (littoral, agglomération montpelliéraine et sa périphérie, basse et moyenne vallée de l'Hérault). Compte tenu de ces perspectives, le Conseil Général de l'Hérault s'est investi dans une politique active de prévision des besoins et de développement de nouvelles ressources en eau : adduction d'eau brute à partir des eaux du Bas-Rhône-Languedoc, diversification des sources d'approvisionnement, etc.

Dans ce dernier cadre, le Département s'est appuyé sur les recommandations du SDAGE RM&C (1996) qui préconisaient, notamment, de développer les connaissances sur les eaux souterraines, de réserver cette ressource aux usages nobles (Alimentation en Eau Potable (AEP)) et d'accroître le recours à la ressource en eau des aquifères karstiques, encore sous-exploités à l'échelle du bassin. Le SDAGE identifiait aussi les aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault comme des aquifères d'importance patrimoniale, « à étudier en priorité ».

1.2. DEROULEMENT DU PROJET

Le Conseil Général de l'Hérault a donc lancé, en 1997, avec l'appui scientifique et technique du BRGM et du CNRS, un projet portant sur l'évaluation de la ressource en eau exploitable au sein des aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault. Ce projet a comporté plusieurs étapes successives, dont le phasage a été calqué sur la méthodologie d'étude des aquifères karstiques, mise au point conjointement par le BRGM et le CNRS :

- de 1997 à 2002 : Phases 1 et 2 d'identification et de caractérisation de la structure et du fonctionnement des deux principaux aquifères karstiques de la moyenne vallée de l'Hérault (émergeant respectivement aux sources des Cent Fonts et des Fontanilles). L'interprétation des données acquises (géologie et développement de la karstification, instrumentation et jaugeage des sources et des pertes, suivis hydrologiques et hydrochimiques, traçages, traitement du signal, etc.) a permis de proposer un modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement de chacun de ces deux systèmes karstiques et, notamment, d'évaluer leurs réserves, la superficie et les contours de leurs bassins d'alimentation, etc..

Le système karstique de la source des Cent Fonts, d'un débit moyen de 1 090 l/s, doté de réserves mobilisables évaluées à 9,3 (+/- 1,6) millions de m³ sur la base de l'estimation du volume dynamique (analyse des courbes de récession de la source des Cent Fonts) et disposant d'un bassin versant de 60 km², peu vulnérable vis-à-vis des risques de pollution, a été retenu pour la suite des études ; le système des

Fontanilles présente de moindres potentialités (réserves évaluées entre 0,2 et 0,5 millions de m³ en particulier) ;

- de 2003 à 2005 : Phase 3, dite de démonstration, destinée à déterminer la part des réserves mobilisables par pompage sur le principal point d'accès à l'aquifère karstique, le drain qui aboutit à la source des Cent Fonts, ainsi que les impacts éventuels de ce pompage. Cette phase d'étude a principalement compris la poursuite de la métrologie de l'aquifère, la réalisation de piézomètres d'observation, l'implantation, la réalisation et l'équipement d'un forage de gros diamètre, situé à quelques centaines de mètres en amont de la source et recoupant le drain karstique entre 120 et 125 m de profondeur, et la réalisation, au cours des mois de juillet à septembre 2005, de pompages d'essai sur ce puits, dont un pompage de longue durée à 400 l/s. L'analyse de l'impact du pompage sur la faune aquatique souterraine a été réalisée par l'Université de Lyon 1 ;
- la fin de l'année 2005 et le premier semestre 2006 sont consacrés à la Phase 4, dite d'évaluation, destinée plus particulièrement à l'analyse de différents scénarios de gestion afin d'évaluer les possibilités d'exploitation du système karstique et de prendre en considération l'ensemble des connaissances acquises au cours du projet.

Ces travaux ont été menés sous la Maîtrise d'Ouvrage du Conseil Général de l'Hérault qui, outre le BRGM et le CNRS pour l'assistance scientifique et technique, s'est appuyé sur plusieurs prestataires, parmi lesquels : ANTEA (maîtrise d'œuvre des travaux de forage et de pompage), Bardot (topographie de la galerie noyée et report en surface pour l'implantation du forage), AMEC-SPIE (installation et fonctionnement de la pompe), FORACO (Forages), BUESTA (travaux piste et plateforme), le CAPLS pour les aménagements paysagers, la CESML, maître d'ouvrage de l'alimentation du site en électricité, ainsi que l'UMR CNRS 5023, Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux, Université CLAUDE BERNARD – Lyon I, pour le suivi hydrobiologique du système karstique avant, pendant et après pompage d'essai.

1.3. RAPPEL DES OBJECTIFS DES ESSAIS DE POMPAGE

Comme cela a été indiqué ci-dessus, les essais de pompage constituent l'une des phases ultimes des travaux de caractérisation de la ressource en eau exploitable au sein d'un aquifère karstique. Les principaux objectifs des pompages d'essai sont les suivants :

- préciser les évaluations des réserves de l'aquifère (zone noyée du karst) établies lors des phases précédentes du projet et surtout déterminer la part de ces réserves qui est mobilisable au moyen du dispositif de pompage testé (forage – drain),
- caractériser en détail l'aptitude de l'ouvrage de captage (le forage faisant l'objet du pompage) à mobiliser les réserves de l'aquifère : pertes de charge au forage et dans son voisinage, évaluation du volume du drain capté, détermination de la nature des structures capacitatives situées en zone noyée (systèmes annexes au drainage, matrice poreuse et/ou fissurée), relations hydrauliques entre le drain et ces structures capacitatives, relations éventuelles avec les eaux de surface, relation entre le débit de pompage et le tarissement des sources, etc.,

- évaluer les impacts éventuels des essais de pompages,
- proposer, sur cette base, des scénarios d'exploitation de la ressource et évaluer notamment l'aptitude du système « forage d'exploitation - aquifère » vis-à-vis de la gestion active de la ressource en eau souterraine,
- évaluer les impacts éventuels de ces scénarios d'exploitation.

Ceci est réalisé à l'aide d'un pompage à fort débit et sur une durée suffisamment longue afin de solliciter de façon significative les réserves du système. Pour que l'expérience conduise à une interprétation acceptable, plusieurs conditions sont requises :

- les pompages d'essai doivent être réalisés sur un site dont l'historique des débits et des paramètres physico-chimiques est bien maîtrisé. Ces conditions sont satisfaites pour le site des Cent Fonts (chroniques disponibles depuis 1997),
- l'ouvrage de pompage doit recouper le réseau de drains ou un système annexe au drainage. La localisation prévue du site de forage satisfait à la première de ces deux conditions,
- l'expérience doit être conduite à un débit de pompage du même ordre de grandeur ou significativement supérieur au débit naturel de la source. En pratique, elle doit donc être mise en oeuvre en étiage. Le débit de pompage envisagé (400 l/s) est significativement supérieur au débit moyen d'étiage (300 l/s).

1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport fait suite au rapport de fin de travaux des pompages d'essai sur le site des Cent Fonts (Commune de Causse de la Selle, Hérault) (BRGM/RP-54426-FR, remis en janvier 2006 au Conseil Général de l'Hérault).

Les objectifs du présent rapport sont les suivants :

- (i) proposer des scénarios d'exploitation de la ressource du système karstique des Cent Fonts, en considérant les besoins en eau, les périodes de pointe au cours d'un cycle hydrologique et leurs durées ainsi que le débit réservé à restituer au fleuve Hérault. 30 scénarios ont été établis, sur la base de discussions menées avec le Conseil Général pour évaluer les besoins en eau (augmentation graduelle de la consommation de mai à septembre et périodes de pointe du 14 juillet au 15 août) ; quatre débits de base pour l'AEP ont été considérés : 100 l/s, 125 l/s, 150 l/s et 200 l/s. 320 simulations ont été effectuées à partir du comportement du système sous sollicitation (pompage d'essais) à l'aide de deux types de modèles en considérant 30 cycles hydrologiques différents couvrant la période de simulation 2006-2016. Les périodes hydrologiques de ces 30 années ont été caractérisées en utilisant un processus stochastique faisant intervenir 500 tirages aléatoires de pluies et d'ETP à partir des chroniques s'étalant de 1995 à 2005, au sein d'un modèle « pluies-débits ». Les chroniques de débits ont été analysées en terme de probabilité d'occurrence. un modèle de transfert pluies-débit.

- (ii) Evaluer l'aptitude du système « forage d'exploitation - aquifère » vis-à-vis de l'exploitabilité de la ressource en eau.
- (iii) Evaluer l'impact environnemental des pompages d'essai réalisés à l'été 2005 sur la faune stygobie du système karstique (Etude réalisée par l'université de Lyon – rapport complet en annexe).

Ce rapport présente, dans le chapitre 2, les scénarios d'exploitation du système karstiques sur la base des besoins en eau dans le secteur de la moyenne vallée de l'Hérault déterminés par la Direction de l'Eau et des milieux Aquatiques (service Ressource et Eau potable) du Département Eau, Pole Environnement Eau Cadre de vie et Aménagement Rural du Conseil Général de l'Hérault et selon diverses hypothèses de débit réservé à restituer au fleuve Hérault. La définition précise de ce débit réservé dépendra de débits d'étiage de référence qui seront fixés dans le cadre du SAGE Hérault.

Le chapitre 3 décrit les deux approches de modélisation numérique utilisées pour la simulation des scénarios d'exploitation de la ressource du système karstique des Cent Fonts. Le Chapitre 4 présente et décrit les résultats des deux modèles et leurs inter-comparaisons. Le chapitre 5 présente et commente les résultats des simulations pour les différents scénarios d'exploitation du système karstique des Cent Fonts à l'aide des deux approches de modélisation numérique, considérant cinq probabilité d'occurrence de contextes hydrogéologiques contrastés et distincts. Le chapitre 6 discute des résultats des simulations dans une perspective d'exploitabilité du système karstique à partir de l'ouvrage existant ayant fait l'objet du pompage ou d'un nouvel ouvrage plus profond. Le chapitre 7 présente et commente les principaux résultats de l'étude environnementale effectuée sur la microfaune du système karstique des Cent Fonts en cours de pompage et postérieure aux pompages (résumé du rapport de l'université de Lyon, UMR CNRS 5023. Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux, Université CLAUDE BERNARD - Lyon1- annexe 8). Finalement le chapitre 8, le dernier chapitre, discute de l'état des connaissances du système karstique, de l'impact du pompage sur la faune stygobie et des recommandations en vue d'une exploitation possible et future du système karstique.

2. Présentation des scénarios d'exploitation du système des Cent Fonts

L'établissement de scénarios d'exploitation de la ressource en eau souterraine du système karstique des Cent Fonts nécessite de considérer d'une part le fonctionnement du système karstique sollicité par pompage et, d'autre part, les besoins en eau pour l'alimentation en eau potable (tout au long d'une année et lors de périodes spécifiques présentant notamment une augmentation de la demande (entre mai et septembre) ainsi que des périodes de pointes (entre le 14 juillet et le 15 août). Le fonctionnement du système karstique des Cent Fonts sollicité par pompage est rappelé ci-dessous au sein du premier paragraphe ; il dépend notamment des conditions hydrologiques. Les deux paragraphes suivant présentent les caractéristiques de la chronique de demande pour l'alimentation en eau potable et celles de la chronique de pompage.

2.1. DESCRIPTION QUALITATIVE DU FONCTIONNEMENT DU KARST DES CENT FONTS SOUMIS A UN POMPAGE

2.1.1. Rappel du fonctionnement du système karstique en régime non influencé

Le système karstique des Cent Fonts est un système binaire alimenté d'une part par les pertes de la Buèges et d'autre part par l'infiltration de la pluie efficace sur son bassin d'alimentation. La superficie totale de celui-ci (bassin versant des pertes et zone de recharge directe) est de 60 km² au total (dont 30 km² correspondant au bassin d'alimentation des pertes de la Buèges). Le volume écoulé aux Cent Fonts est de l'ordre de 33 millions de m³ par an. La contribution moyenne des pertes de la Buèges à l'écoulement des Cent Fonts est évaluée à 50 %. La ressource en eau du système est considérée comme importante avec un débit moyen légèrement supérieur à 1 m³/s. Les réserves (volume dynamique) sont significatives, avec une valeur estimée à 9 millions de m³ sur la base de l'analyse des courbes de récession de plusieurs cycles hydrologiques. Le système présente des retards à l'infiltration, liés à la contribution des pertes de la Buèges, la réponse à l'infiltration (pluie et pertes) dure 50 jours environ. Le système karstique apparaît globalement inertiel et est propice à l'accumulation et à la reconstitution des réserves.

En contexte naturel, l'essentiel du débit de la source est ainsi assuré par la zone noyée (79 %), l'écoulement rapide issu du réservoir épikarstique (21 %) étant minoritaire (Ladouche et al, 2002). En étiage sévère, le débit de la source des Cent Fonts quasi uniquement assuré par la vidange de la zone noyée de l'aquifère, au très faible débit en provenance des pertes de la Buèges près.

A partir du modèle d'interprétation du pompage d'essai (BRGM/RP-54426-FR), il est possible d'apporter des éléments supplémentaires de conceptualisation du fonctionnement du système karstique des Cent Fonts notamment le fait qu'en l'absence de pompage, le débit de débordement du réservoir « drain karstique » correspond au débit de la source alimentée, en étiage, essentiellement par la contribution naturelle des blocs et, dans une moindre mesure, par les pertes de la Buèges.

2.1.2. Fonctionnement du système karstique des Cent Fonts sollicité par pompage

Le système karstique des Cent Fonts, et plus particulièrement la charge hydraulique au sein du réseau karstique, est fonction d'une part des conditions hydrologiques et d'autre part, du débit de pompage. Les conditions hydrologiques ont une influence sur la recharge de l'aquifère, tant par les précipitations efficaces qui s'infiltrent que par le débit des pertes de la Buèges. Le débit susceptible d'être prélevé par pompage ne dépend pas uniquement de la demande en eau pour l'alimentation en eau potable ; il est également contraint par le débit à la source et le débit réservé à restituer au fleuve Hérault (Illustration 1).

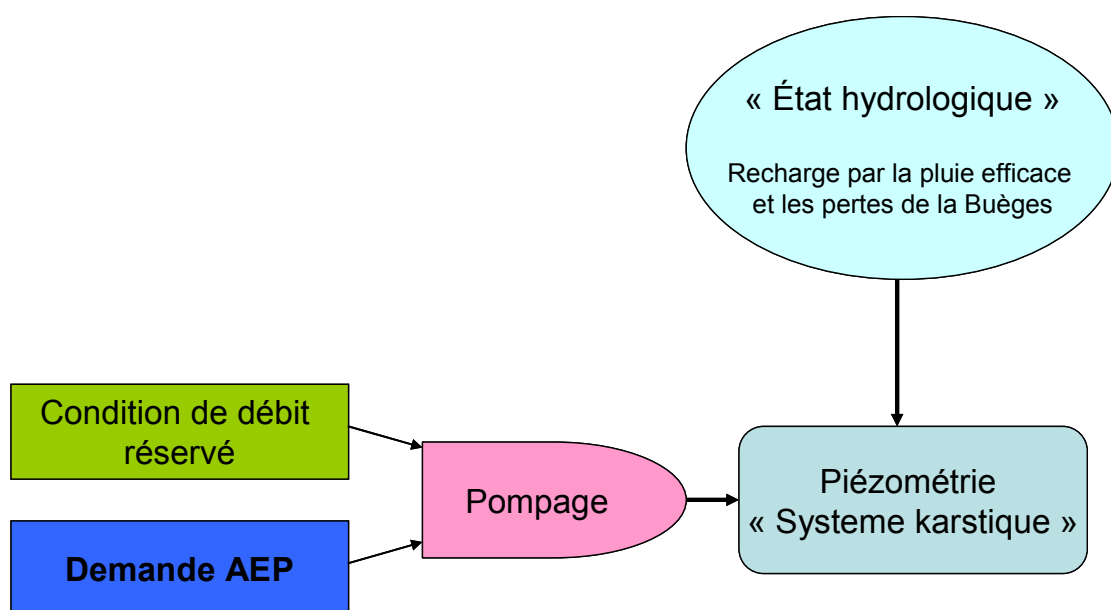


Illustration 1 - synoptique présentant les variables qui influencent la piézométrie du drain karstique des Cent Fonts

L'état hydrologique du système karstique est à relier directement à l'importance de la recharge par les pertes de la Buèges et par les pluies efficaces apportées lors des périodes pluvieuses. L'état hydrologique du karst peut être caractérisé par la valeur du débit qu'aurait présenté la source en absence de pompage. L'approche méthodologique élaborée et décrite dans les paragraphes suivants pour étudier

différents scénarios de gestion de la ressource du système karstique des Cent Fonts repose sur ce postulat de base.

La fonction de sollicitation par pompage du système ne se résume pas uniquement à une chronique de demande en eau potable (AEP). Elle dépend (1) de la valeur du débit en eau potable (demande AEP), (2) de la valeur du débit résiduel à la source ($QCF_{\text{résiduel}} = QCF_{\text{naturel}} - Q_{\text{Pompage}}$) et des conditions de débit réservé à restituer au fleuve Hérault.

La valeur du débit des Cent Fonts à restituer au fleuve Hérault (débit réservé) sera définie ultérieurement, dans le cadre d'une concertation entre les différents acteurs du SAGE Hérault. La valeur du débit à réserver sera notamment fonction des débits d'objectifs du fleuve Hérault en différentes sections, dont au niveau de la prise d'eau du canal de Gignac. Dans le cadre de cette étude, nous avons ainsi considéré plusieurs hypothèses de débit à réserver afin d'étudier et de proposer différents scénarios de gestion de la ressource en eau des Cent Fonts. En période d'étiage, trois valeurs de débit à restituer à l'Hérault ont été considérées : 200 l/s, 250 l/s et 300 l/s.

2.2. CARACTERISTIQUES DE LA CHRONIQUE DE PRELEVEMENT POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (AEP)

Le schéma départemental de référence pour l'alimentation en eau potable à l'horizon 2015 approuvé le 13 décembre 2005 a évalué par zone l'adéquation entre les besoins et les ressources à partir d'une part, des données de ressource en étiage et d'autre part, des besoins journaliers moyens de la semaine de pointe.

Dans le cadre de ce schéma, des scénarios pour répondre aux déficits prévisibles à l'horizon 2015 ont été présentés. Ainsi, pour le nord montpelliérain et la moyenne vallée de l'Hérault, et selon différents scénarios de répartition de la ressource, ce sont des débits de l'ordre de 100 à 400 l/s qui pourraient être demandés à la source des Cent Fonts.

En vue d'être intégré aux simulations effectuées par le BRGM au travers des modèles TEMPO et MATLAB, les caractéristiques de la chronique de prélèvement pour l'alimentation en eau potable à partir des Cent Fonts ont été définies par le Conseil général de l'Hérault en prenant pour débit moyen journalier de la semaine de pointe les valeurs suivantes : 200, 250, 300 et 400 l/s. Ces débits rentrent dans la fourchette de besoins estimées par le schéma départemental dans la zone d'étude. Les données de production hebdomadaire de pointe étant trop rares pour permettre une étude statistique sérieuse des coefficients de pointe hebdomadaire, le schéma départemental fait l'hypothèse que le coefficient de pointe hebdomadaire est 1,2 fois le coefficient de pointe mensuel. Pour la zone moyenne vallée de l'Hérault et nord montpelliérain les coefficients de pointe hebdomadaire sont respectivement de 1,8 et 2.

Autres données issues du schéma départemental :

- la dotation moyenne pondérée par la population équivalente est sur le département de $d=186$ l/j/habitant,

- la demande en eau de pointe est égale à la dotation moyenne multipliée par la population équivalente, multipliée par le coefficient de pointe hebdomadaire et divisée par le rendement du réseau,
- l'objectif pour 2015 est d'arriver à un rendement au minimum de 75 %.

A partir des coefficients de pointe ci dessus et des chroniques de production mensuelle de quelques collectivités de l'Hérault à caractère rural ou urbain (hors littoral où les pointes estivales sont plus prononcées) le Conseil général de l'Hérault (PEE/DEMA) a établi les chroniques figurant en illustration 2 et 3. Elles mettent en évidence une augmentation graduelle de la consommation à partir du mois de mai. Les semaines de pointes de consommation sont généralement observées lors des semaines du 14 juillet et du 15 août au cours de la période estivale. Le retour à une consommation normale est généralement observé dans le courant du mois de septembre.

Cette chronique reste une hypothèse de travail qui mériterait d'être calée sur une production déterminée lorsqu'une collectivité se prononcera sur la maîtrise d'ouvrage de la ressource. En effet, il n'y a pas de chroniques de production types. Elles varient selon les collectivités et, pour une même collectivité, selon les années. La pointe de production mensuelle estivale (incluant la pointe hebdomadaire) est de 1.6 fois la valeur mensuelle de base (période du 1^{er} octobre au 15 mai). Différentes valeurs de débit de base sont considérées dans cette étude : 100 l/s, 125 l/s, 150 l/s et 200 l/s (Illustration 3).

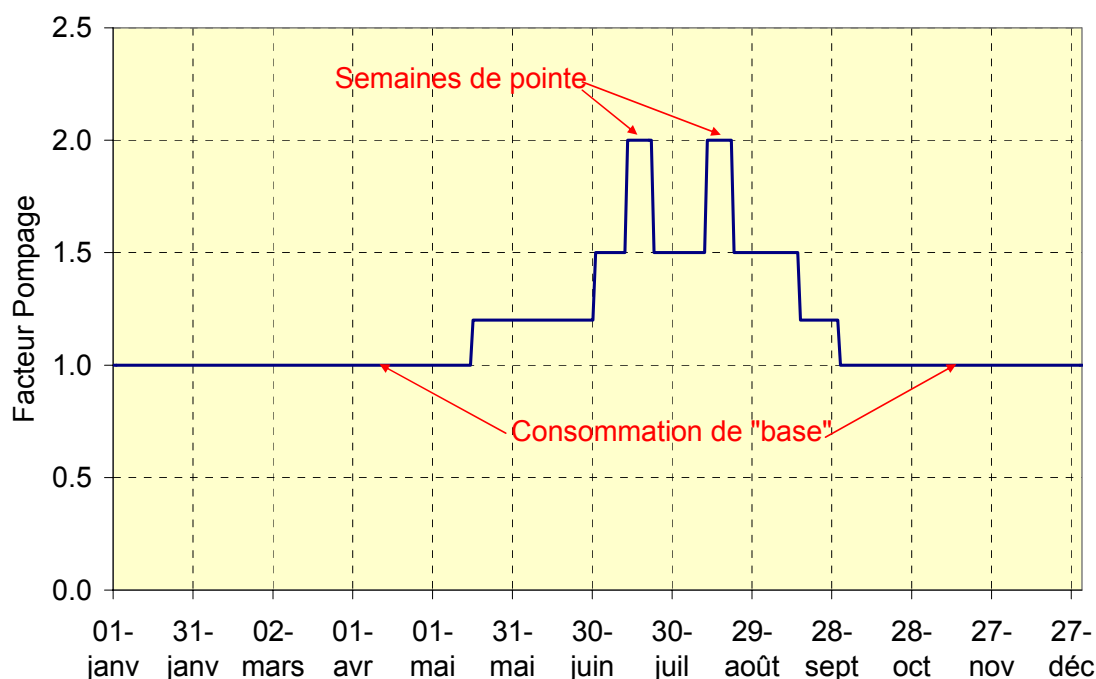


Illustration 2 - Chronique de facteur de pompage déduit de l'analyse des consommations en eau potable sur le secteur par le Conseil Général de l'Hérault

Quatre chroniques différentes de pompage sont ainsi prises en compte, les volumes annuels d'eau potable prélevés, correspondant à chacune des chroniques sont reportés dans le Tableau 1.

Tableau 1- Volume annuel et débits pour l'alimentation en eau potable et pour les semaines de pointe selon 4 scénarios

Base AEP (l/s)	100	125	150	200
Semaine de pointe (l/s)	200	250	300	400
Volume annuel (million de m ³)	3.68	4.6	5.52	7.36

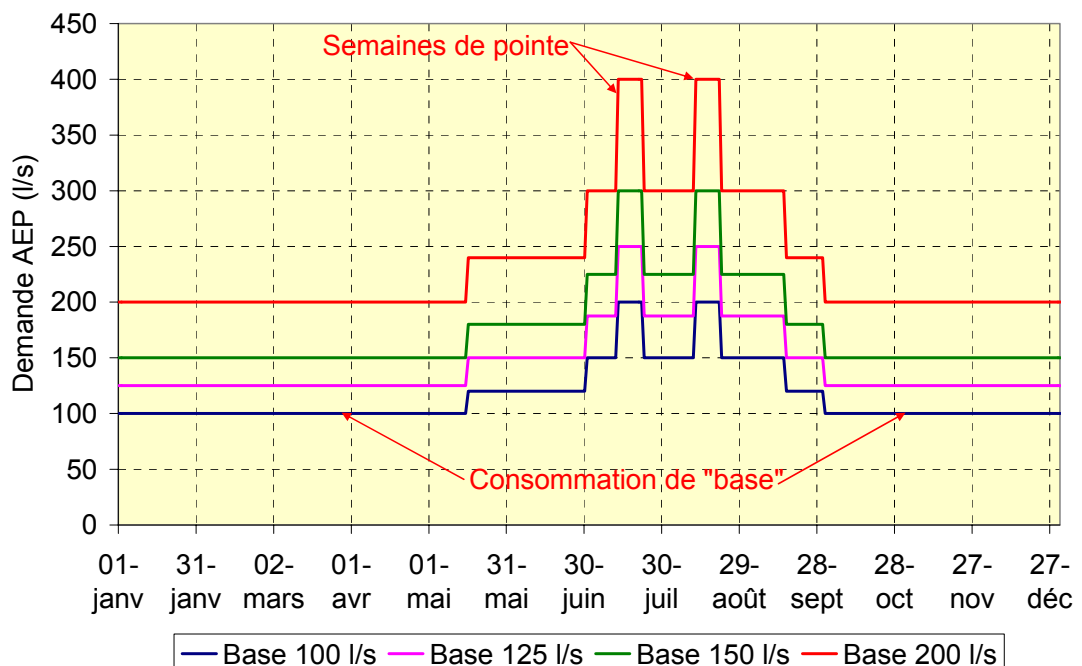


Illustration 3 - Chroniques de pompage pour l'alimentation en eau potable (AEP) utilisées dans le cadre de la présente étude

2.3. CARACTERISTIQUES DE LA CHRONIQUE DE POMPAGE

Il a été précédemment souligné que la chronique de pompage est définie à la fois par le débit correspondant aux besoins pour l'alimentation en eau potable (AEP) et par les conditions de débit à réserver au fleuve Hérault ; elle est également fonction du contexte hydrologique.

Pour un scénario de pompage AEP donné (par exemple base AEP = 100 l/s, ce qui équivaut à pomper 200 l/s en semaine de pointe, cf. Illustration 3), la chronique de pompage réelle à exercer sur le système karstique des Cent Fonts est complexe et dépend de deux facteurs déterminants :

1. l'état hydrologique du karst, à relier directement à l'importance de la recharge par les pertes de la Buèges et par les pluies efficaces. L'état hydrologique du karst peut être renseigné par la valeur du débit qu'aurait présenté la source en l'absence de pompage,
2. des conditions de débit à réserver au fleuve Hérault.

Deux périodes distinctes sont à distinguer au cours d'un cycle hydrologique :

1. les périodes de moyennes et hautes eaux,
2. les périodes de basses eaux qui coïncident généralement avec les périodes estivales.

Lors des périodes de moyennes et hautes eaux, le débit de la source karstique des Cent Fonts est très nettement supérieur à 500 l/s (Illustration 4). Supposons, par exemple, que le débit de la source soit de 800 l/s (valeur généralement observée en mai en contexte hydrologique d'année « normale¹ »). Dans ces conditions, un prélèvement d'eau pour l'AEP de 100 l/s par exemple se traduit par une diminution de 100 l/s du débit qu'aurait présenté la source en absence de pompage. Le débit résiduel de la source est donc de 700 l/s. Si les conditions de débit à réserver au fleuve Hérault sont inférieures à ces 700 l/s ($Q_r = 300$ l/s par exemple), il n'y a pas lieu de pomper un débit supplémentaire pour satisfaire la condition de débit réservé. On a alors $Q_{\text{pompage}} = Q_{\text{AEP}}$ (Illustration 5)

Lors des périodes de basses eaux, le débit de la source karstique des Cent Fonts est inférieur à 500 l/s. En contexte hydrologique d'année fortement déficitaire en précipitations et donc en recharge (exemple d'un contexte hydrologique de période de retour « 30 ans secs », cf. Illustration 4), le débit de la source à la mi-juin est inférieur à 350 l/s. A cette époque, la demande en eau potable est multipliée par un facteur de 1.2 par rapport à la demande de base. Dans notre exemple, si le débit de base est de 100 l/s, la demande en eau pour l'AEP à la mi-juin est donc de 120 l/s.

Le débit résiduel des Cent Fonts serait donc alors dans cet exemple de 230 l/s ($350 \text{ l/s} - 120 \text{ l/s}$). Si les conditions de débit à réserver au fleuve Hérault sont de 300 l/s, alors il faut pomper un débit supplémentaire de 70 l/s pour satisfaire la condition de débit réservé. Le débit total de pompage est donc de 190 l/s ($120 \text{ l/s} + 70 \text{ l/s}$). C'est ce qui explique que le débit total de pompage devient significativement différent du débit pour l'AEP lors des périodes d'étiage (Illustration 5)

¹ Année médiane

Lorsque le débit de pompage supplémentaire (Q_{sup}) devient supérieur au débit résiduel des Cent Fonts, alors les sources tarissent et le débit résiduel des Cent Fonts devient nul. C'est à partir de ce moment que l'on sollicite les réserves du karst et que le niveau piézométrique commence à diminuer (rabattement). L'Hérault commence alors à alimenter le karst (Illustration 4), à une valeur de l'ordre de 30 l/s (valeur déterminée lors de l'essai de pompage, Ladouche et al., 2005 BRGM/RP 54426-FR).

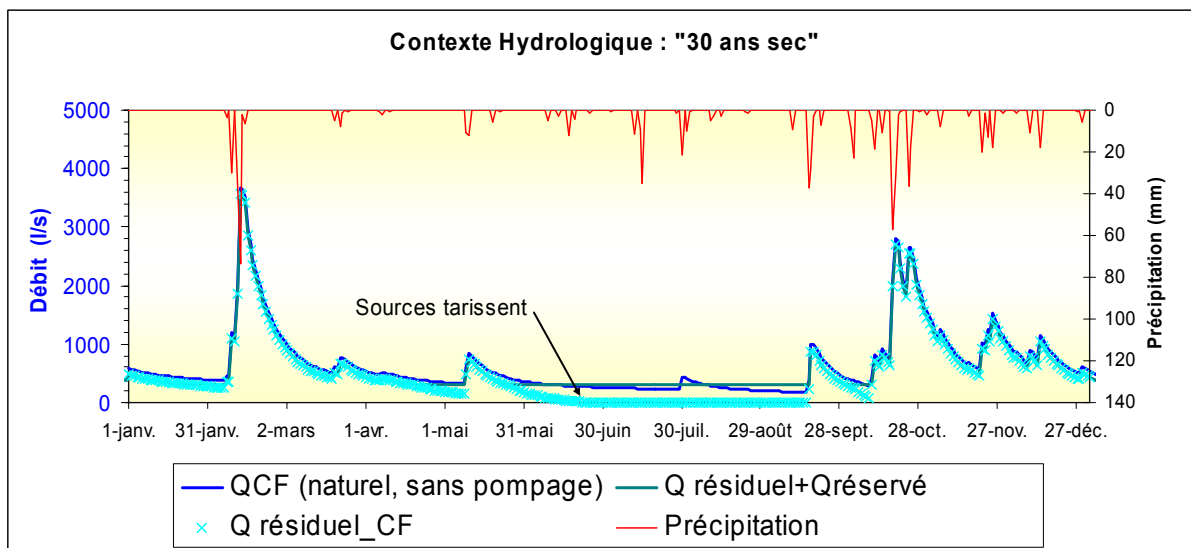


Illustration 4 - Evolutions temporelles des débits (naturel et résiduel) de la source des Cent Fonts et du débit réservé lors d'un pompage (paramètre de l'exemple : contexte hydrologique trentenal sec, base AEP = 100 l/s, débit réservé = 300 l/s)

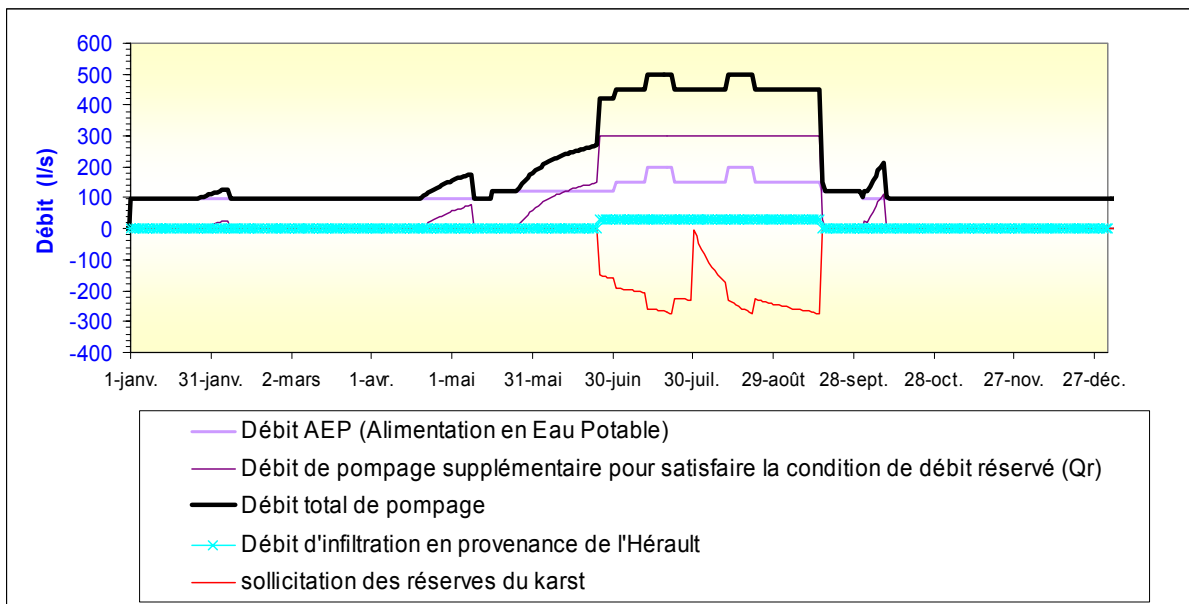


Illustration 5 - Evolutions temporelles des débits de pompage AEP, du débit supplémentaire à pomper pour satisfaire les conditions de débit réservé et du débit total de pompage (QAEP+Q_{sup}). La sollicitation des réserves du karst se produit lorsque le débit total de pompage est supérieur au débit naturel qu'aurait présenté le système en absence de pompage. Lorsque le débit de sollicitation devient <0, les sources tarissent, le système est alors alimenté par un flux d'eau en provenance de l'Hérault (Q = 30 l/s). Paramètres de l'exemple : contexte hydrologique trentenais sec, base AEP = 100 l/s, débit réservé = 300 l/s.

La sollicitation des réserves du karst intervient lorsque le débit total de pompage devient donc supérieur au débit naturel qu'aurait présenté la source des Cent Fonts en l'absence de pompage. La fonction de sollicitation est alors définie de la manière suivante :

$$\text{Sollicitation} = \text{QCF naturel} - Q_{\text{pompage}}$$

La fonction de sollicitation est nulle lorsque le débit naturel des Cent Fonts est supérieur au débit de pompage (Illustration 5) et négative (par convention) lorsque le débit naturel des Cent Fonts est inférieur au débit de pompage.

En étiage, lorsque les sources sont tarées, le débit de pompage est donc égal à la somme du débit à réserver à l'Hérault et du débit AEP. Trois scénarios de débit à réserver à l'Hérault en étiage ont été considérés dans cette étude : 200 l/s ; 250 l/s et 300 l/s. Compte tenu des valeurs des débits des semaines de pointe considérées (200 l/s, 250 l/s, 300 l/s et 400 l/s), le débit maximum de pompage au cours de la période estivale lors des semaines de pointes est donc compris entre 400 l/s et 700 l/s.

3. Présentation des modèles de simulation

Deux types de modèles numériques ont été utilisés pour simuler les différents scénarios de gestion de la ressource. Ils prennent en compte : les besoins en eau, les conditions hydrologiques affectant le système karstique et le débit réservé à restituer au fleuve Hérault. Il s'agit d'une part d'un modèle global (TEMPO) basé sur la détermination par modélisation inverse de fonctions de transfert et, d'autre part, d'un modèle à réservoirs, couplé à une solution analytique de type écoulement vers une tranchée. Ces deux modèles sont présentés ci-dessous.

3.1. DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE MODELISATION A L'AIDE DU LOGICIEL TEMPO.

Nous avons vu précédemment que l'approche méthodologique mise en œuvre pour étudier différents scénarios de gestion de la ressource en eau des Cent Fonts repose sur la connaissance du débit naturel des Cent Fonts et donc, de manière indirecte, sur la connaissance de la recharge par les pluies efficaces et par le débit des pertes de la Buèges.

Dans la phase préliminaire au pompage d'essai de 2005, une nouvelle approche de modélisation à l'aide de l'outil Tempo a été mise en œuvre (Ladouche et Dörfliger, 2004, BRGM/RP-53595-FR) afin d'étudier et de modéliser le comportement hydrologique du système karstique des Cent Fonts dans différents contextes hydroclimatiques.

Nous rappelons ci-après de manière très succincte le principe général de cette approche de modélisation puis nous décrirons plus en détail ce qui a été mis en œuvre dans le cadre de la présente étude.

3.1.1. Principe général de l'approche de modélisation Tempo

Dans le but d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique du système karstique des Cent Fonts, une modélisation pluie-débit a été réalisée dans la phase précédente du projet (Ladouche et al, 2002 ; Ladouche et Dörfliger, 2004) à l'aide d'un modèle global dit « boîte noire » (logiciel TEMPO développé au brgm) dans lesquels les écoulements sont décrits à l'aide de fonctions de transfert.

Le type d'approche utilisée apporte, à partir du suivi en continu d'un niveau piézométrique, d'un débit et de paramètres physico-chimiques tels que la conductivité et la température de l'eau, des renseignements sur les processus de transfert responsables des variations observées et, ce faisant, sur les mécanismes régissant le fonctionnement d'un hydrosystème. Ces mécanismes font intervenir la recharge du système, mais également la contribution de ses différentes connexions hydrauliques lorsqu'un contraste des paramètres physico-chimiques est observé entre ses

différentes composantes (épikarst et conduits, conduits et matrice fissurée peu perméable, etc....).

Le traitement numérique des chroniques fait appel à des techniques d'inversion. On parle alors de modélisation inverse des phénomènes. Contrairement à la modélisation directe qui consiste à simuler le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de l'hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse décrit le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de réponses impulsionnelles (ruissellement, écoulement souterrain, transfert de masse). Ces réponses impulsionnelles (appelées également fonctions de transfert) sont estimées à partir de séries chronologiques : pluie, débit, niveau piézométrique, concentration de divers solutés, propriétés physico-chimiques du milieu.

3.1.2. Structure du modèle Tempo

Le schéma de principe de l'approche de modélisation mise en œuvre dans cette étude est présenté sur l'illustration 6. Le modèle est composé d'un modèle de transfert permettant de simuler le niveau piézométrique à la source des Cent Fonts. Ce modèle comporte plusieurs entrées, dont celles issues de deux sous-modèles à savoir le sous-modèle « débit naturel des Cent Fonts » et le sous-modèle « pertes de la Buèges ». Ces différentes composantes du modèle ainsi que le modèle de transfert « piézométrie des Cent Fonts » sont présentées ci-dessous.

a) Description du modèle « niveau piézométrique » à la source des Cent Fonts

Le modèle de transfert « Niveau piézométrique » nécessite en entrées les variables suivantes :

- Pluie efficace, calculée par inversion à l'aide de la chronique de pluie et d'ETP (=variable dite climatique)
- Débit des pertes, calculé à l'aide du sous modèle de transfert « Pertes »
- Fonction de sollicitation (qui engendre une diminution du niveau piézométrique lorsque le débit de pompage devient supérieur au débit naturel des Cent Fonts). Le débit naturel des Cent Fonts est calculé à l'aide du sous modèle de transfert « Débit naturel des Cent Fonts »
- Débit de l'Hérault (=30 l/s= contribution de l'Hérault au karst) lorsque les sources tarissent, c'est-à-dire lorsque le débit de sollicitation est inférieur à 0.

La fonction de sollicitation correspond à la fonction de sollicitation décrite précédemment (§ 2.1.2) : Sollicitation = (QCF naturel – Qpompage). La fonction présente les valeurs suivantes :

- Fonction de sollicitation = 0 si QCF naturel > Qpompage.
- Fonction de sollicitation = (QCF naturel – Qpompage) si QCF naturel < Qpompage.
- Si la fonction de sollicitation < 0, alors Q Hérault = 30 l/s

La fonction de pompage est calculée suivant le principe méthodologique décrit précédemment (§ 2.1.2).

La description détaillée des fonctions de transfert du modèle de transfert « niveau piézométrique » et des résultats du calage sont présentés dans le paragraphe 3.3.

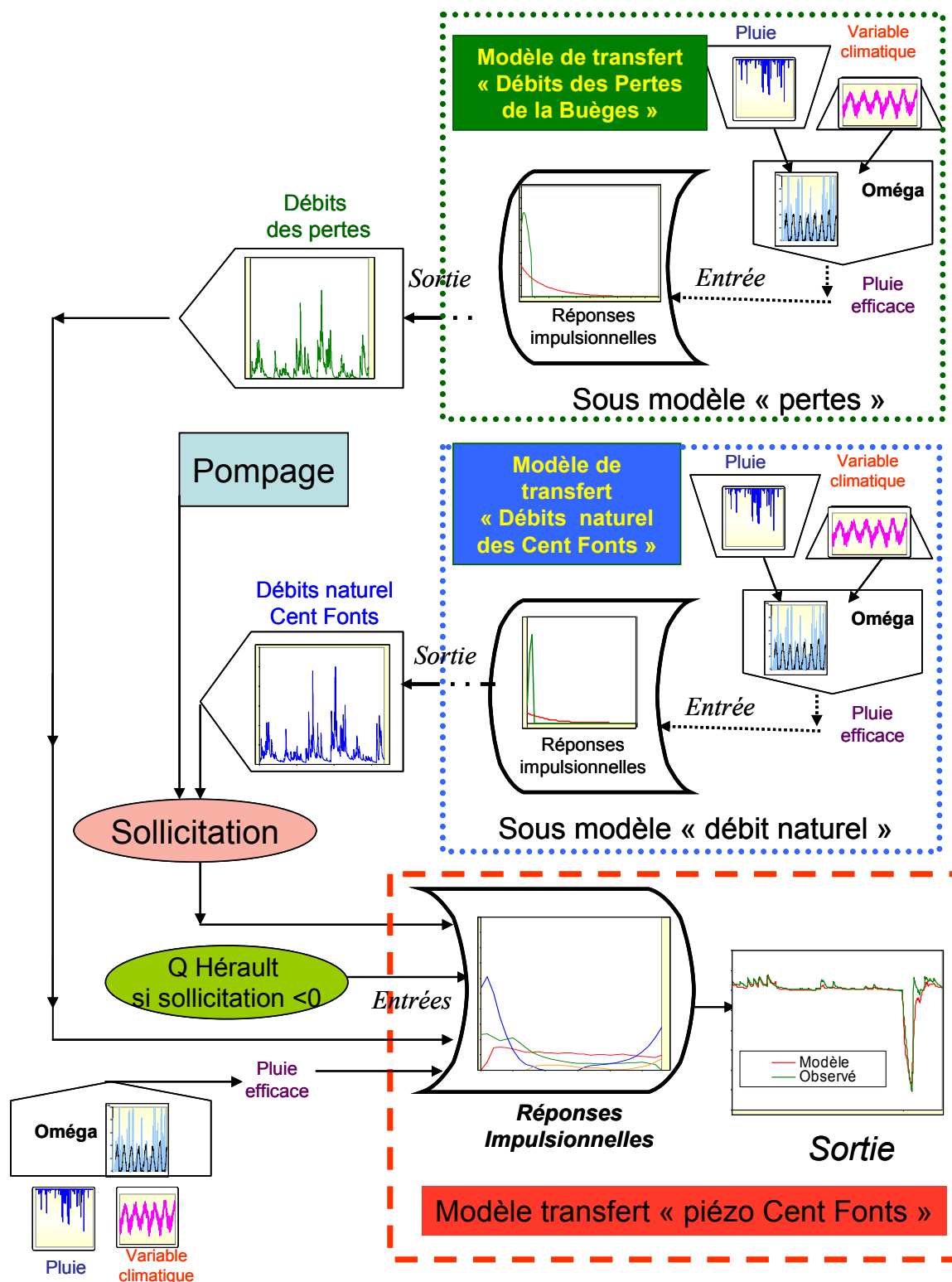


Illustration 6 - schéma de principe du modèle de transfert Cent Fonts « piézométrie »

b) Description et présentation des fonctions caractéristiques du sous modèle « Débit Naturel de la source des Cent Fonts ».

La contribution des pertes (débit des pertes) n'est pas explicitement intégrée comme entrée dans le sous modèle « Débit Naturel de la source des Cent Fonts ». Les traitements mathématiques permettent uniquement de caractériser la réponse impulsionnelle globale du système karstique (les signaux « pluie » et « pertes » ne sont pas déconvolués).

Données utilisées :

L'analyse et l'interprétation des résultats portent sur les données de débits de la source des Cent Fonts acquises entre le 1 juin 1997 et le 31 décembre 2005, soit un peu plus de 8 ans.

Les variables hydroclimatiques utilisées dans la simulation sont les suivantes :

- variable climatique : ETP Montpellier Fréjorques (données Météo France). L'éloignement du site considéré n'est pas préjudiciable dans l'approche de modélisation utilisée car seules les variations relatives sont prises en compte dans les calculs (les variables d'entrées sont dites « centrées réduites ») ;
- variable pluie : Pluie à Aniane; St-Martin-de-Londres ; St-Maurice-Navacelle; Caylar (données Météo France).

La première analyse a consisté à déterminer quels sont les sites pluviométriques qui permettent d'expliquer au mieux la variance des débits. Cette analyse a été menée à l'aide de l'option pondération des chroniques de pluie de Tempo qui consiste à établir le corrélogramme croisé « pluie-débit » à partir d'une optimisation d'une combinaison linéaire des poids associés à chaque chronique de pluie.

La chronique de pluie utilisée pour la réactualisation des résultats de modélisation est légèrement différente de celle précédemment obtenue (Ladouche et Dörfliger, 2004)² :

$$\text{Pluie\_BV} = 0.17 * \text{Aniane} + 0.25 * \text{St-Martin-de-Londres} + 0.50 * \text{St-Maurice-Navacelle} + 0.08 * \text{Caylar}$$

Paramètres du modèle

L'option « modèle paramétrique » de Tempo a été utilisée afin de bien contraindre les débits d'étiage des Cent Fonts. Dans l'approche paramétrique utilisée, la recharge par les précipitations est décrite par une réponse impulsionnelle qui convolue une fonction analytique complexe constituée de deux réservoirs (Modèle de Samani et Ebrahimi,

² En 2004, la fonction de pondération des précipitations était la suivante (pour la période du 01/06/97 au 03/08/04) :

$$\text{Pluie\_BV} = 0.17 * \text{Aniane} + 0.22 * \text{St-Martin-de-Londres} + 0.27 * \text{St-Maurice-Navacelle} + 0.34 * \text{Caylar}$$

1996), la vidange de la zone noyée étant décrite par une fonction exponentielle décroissante.

La technique d'inversion par l'approche de modélisation Tempo consiste à calculer l'hydrogramme unitaire (Illustration 7) et le seuil Oméga de pluie efficace (Illustration 8) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit de la source des Cent Fonts observé (Illustration 9). Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et d'une variable climatique (ETP, Montpellier Fréjorgues) de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Le seuil est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et à la température de l'air (Illustration 10), également obtenue par inversion.

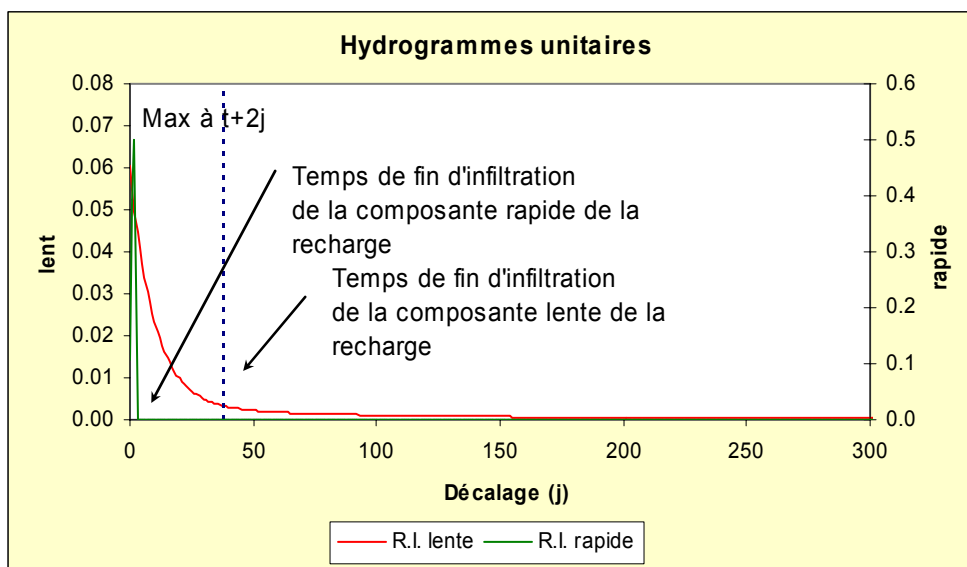


Illustration 7 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés (réponses impulsionnelles) de la source des Cent Fonts (réponses impulsionnelles globales du système).

Les résultats de la modélisation³ sont présentés sur l'Illustration 9. Le modèle permet de reproduire fidèlement les évolutions observées lors des étiages ; les pics de crues et le tarissement sont globalement assez bien reproduits. Le modèle permet d'expliquer 85 % de la variance totale observée, ce qui constitue un bon résultat (critère de Nash = 0.76). La réponse impulsionnelle rapide de la recharge (Illustration 7) montre un maximum très prononcé le 2^e jour, la réponse impulsionnelle lente de la recharge décroît progressivement jusqu'à ce que le décalage atteigne 40 jours environ. Après cette date (40 jours), la recharge par les pluies efficaces devient négligeable. Le temps de fin d'infiltration (35 jours) est compatible avec le temps moyen de fin d'infiltration (57 jours $\pm$ 13 j, cf. Annexe 1) déterminé par l'analyse des 8 courbes de récession (période 1998-2005). Rappelons que lorsque que le décalage atteint 40-45

³ Surface du bassin d'alimentation utilisée par le modèle = 59.8 km²

jours en moyenne, la contribution de la recharge déterminée par la méthode (résultats présenté en annexe 1) devient très faible ($< 30 \text{ l/s}$).

Le temps de transit moyen de la composante lente pris dans sa globalité (barycentre de la réponse impulsionnelle) est de 91 jours, ce qui permet de souligner la nature inertielle de ce système karstique.

La vidange est caractérisée par un coefficient de tarissement de 0.003 j^{-1} , valeur comparable au coefficient de tarissement moyen ($0.0037 \text{ j}^{-1} \pm 0.0004$) déduit de l'analyse des courbes de récession de la source des Cent Fonts (cf. Annexe 1).

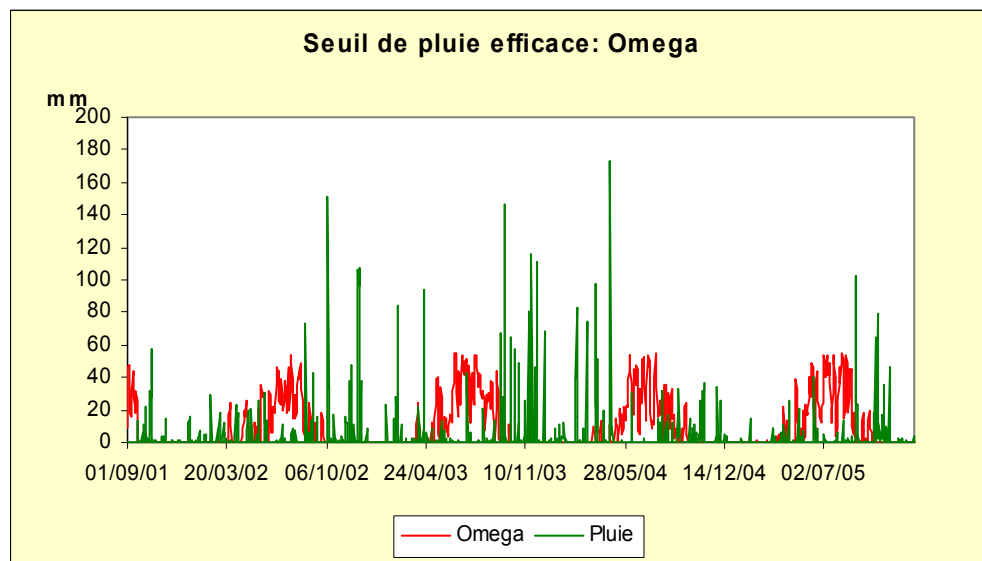


Illustration 8 - Évolution du seuil de pluie efficace Oméga et de la pluviométrie

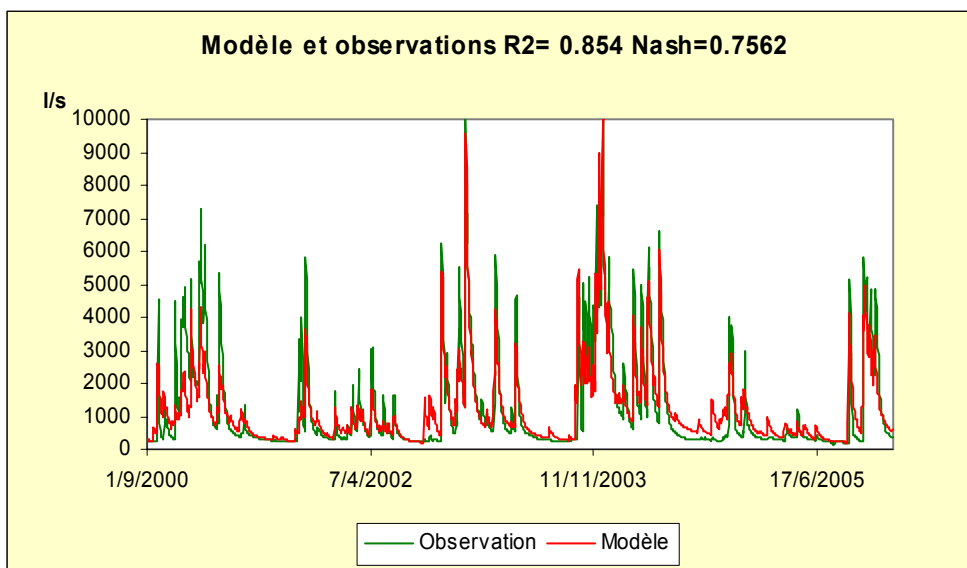


Illustration 9 - Comparaison du débit modélisé au débit mesuré à la source des Cent Fonts : (85 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.76).

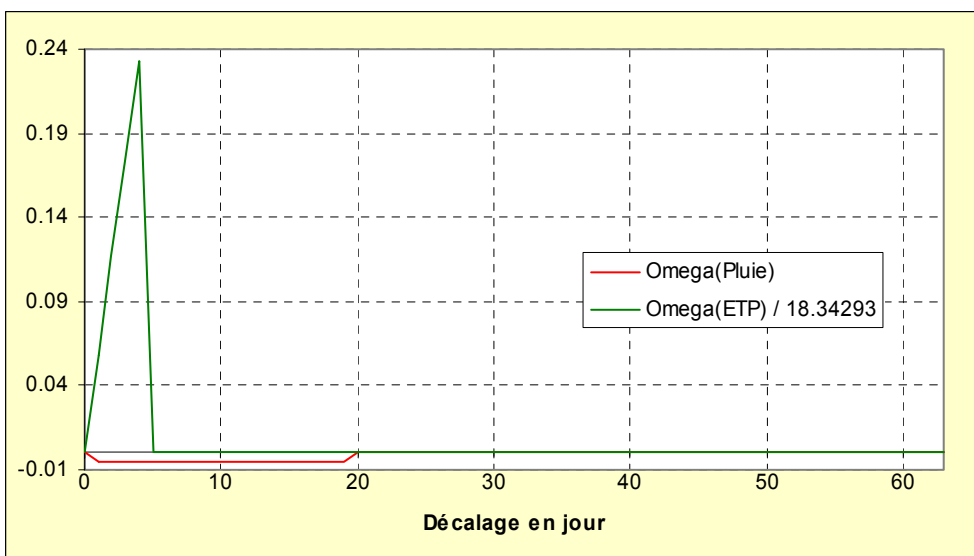


Illustration 10 - Réponse impulsionnelle d'Oméga à la pluie et à l'ETP.

c) Description et présentation des fonctions caractéristiques du sous modèle
«débit des pertes de la Buèges »

Pour les pertes de la Buèges, nous avons également travaillé avec la même option que précédemment (« modèle paramétrique ») afin de bien contraindre les débits d'étiage. La vidange est également décrite par une fonction exponentielle décroissante. Les données d'entrées (pluie et ETP) sont les mêmes que celles du sous modèle « Débit Naturel de la source des Cent Fonts ».

De la même façon que précédemment, la technique d'inversion par l'approche de modélisation Tempo consiste à calculer l'hydrogramme unitaire (Illustration 11) et le seuil Oméga de pluie efficace de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit des pertes observé (Illustration 12). Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et d'une variable climatique (ETP, Montpellier Fréjorgues) de telle façon que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit aux pertes. Il est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et de l'ETP, également obtenue par inversion.

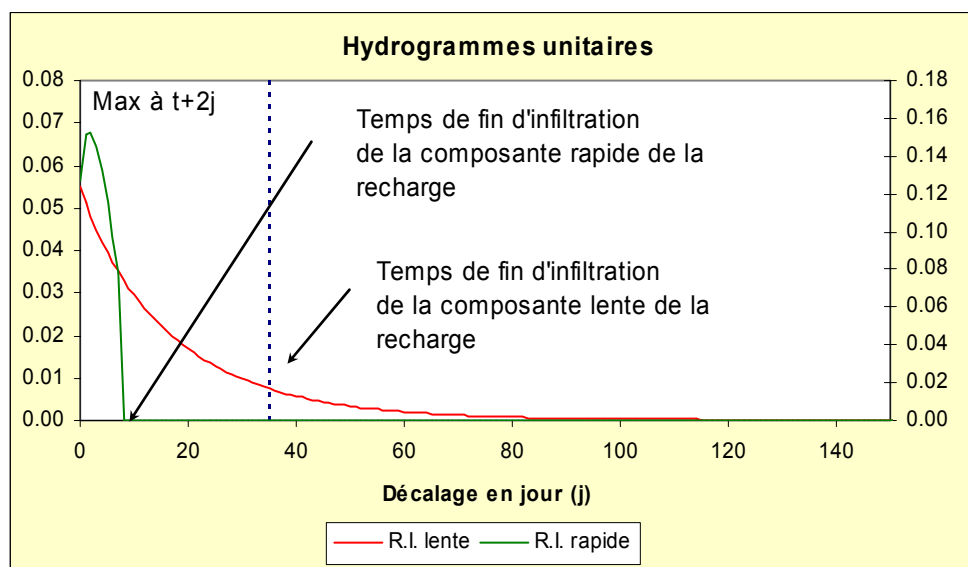


Illustration 11 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés (réponses impulsionnelles) de pertes de la Buèges.

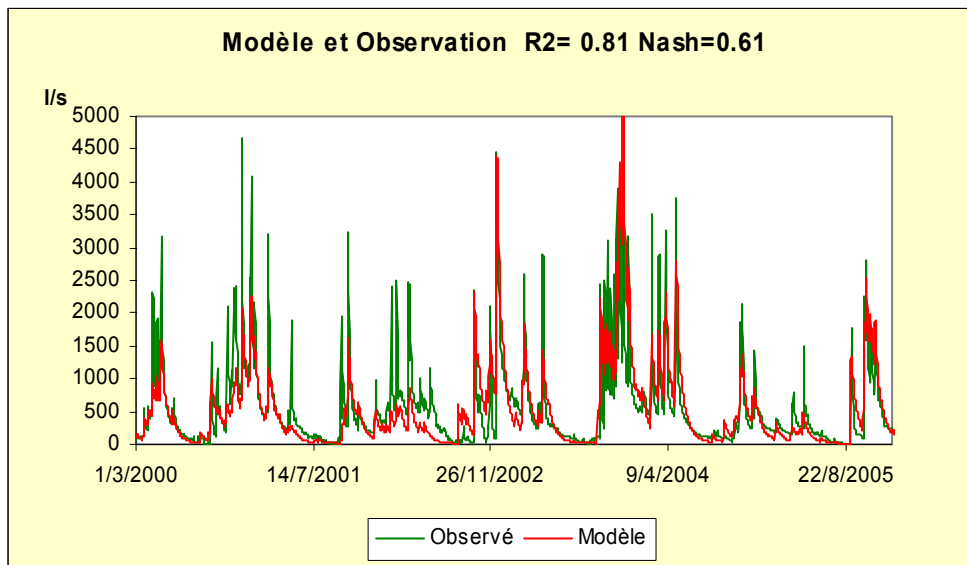


Illustration 12 - Comparaison du débit modélisé au débit mesuré au pertes de la Buèges: (81 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.61).

Les résultats de la modélisation sont présentés sur l'illustration 12. La surface de bassin versant calculé par le modèle est de 27 km². Cette estimation est en accord avec les résultats obtenus lors des phases antérieures du projet : il a été montré que les pertes de la Buèges contribuent pour 50 % à l'écoulement des Cent Fonts, qui présente une surface de bassin d'alimentation de 60 km². Le modèle permet de reproduire assez fidèlement les évolutions observées lors des étiages ; les pics de crues et le tarissement sont globalement assez bien reproduits. L'année 2001 modélisée apparaît sous estimée par rapport aux observations, ce qui peut dénoter une sous estimation des précipitations utilisées en entrée cette année là. Le modèle permet d'expliquer 81 % de la variance totale observée, ce qui permet là encore l'étude quantitative du fonctionnement du système des pertes (critère de Nash = 0.61). La réponse impulsionnelle rapide de la recharge (Illustration 11) montre un maximum très prononcé le 2^e jour, la réponse impulsionnelle lente de la recharge décroît progressivement jusqu'à ce que le décalage atteigne 30-35 jours environ. A cette date, l'influence des précipitations devient négligeable.

Le temps de transit moyen de la composante lente des pertes de la Buèges pris dans sa globalité (barycentre de la réponse impulsionnelle) est de 24.5 jours. La composante lente des pertes de la Buèges présente donc globalement peu d'inertie en comparaison avec les Cent Fonts (temps de transit moyen = 91 jours).

La vidange est caractérisée par un coefficient de tarissement assez rapide de 0.045 j⁻¹.

3.1.3. Description du modèle de transfert « piézométrie des Cent Fonts »

a) Objectif

Les modèles présentés précédemment permettent de bien contraindre le fonctionnement et de reproduire de manière satisfaisante les évolutions mesurées des débits des pertes de la Buèges et de la source des Cent Fonts. Nous allons pouvoir maintenant utiliser les caractéristiques des différentes réponses impulsionnelles ainsi individualisées afin de simuler de manière prévisionnelle l'évolution des débits (pertes et source des Cent Fonts) lorsque le système est soumis à telle ou telle condition hydroclimatique.

La prévision d'un débit à la source ou au pertes requière de disposer de chronique de pluie efficace, la pluie efficace étant elle-même déduite à partir de séquence de pluie et d'ETP. Pour utiliser un modèle de transfert en mode prévisionnel, il faut donc au préalable construire des « générateurs aléatoires » de pluie et d'ETP dont les caractéristiques satisfassent un certain nombre de conditions déduites de l'analyse des séries temporelles de pluie et d'ETP observées. En effet, la prévision d'une séquence de pluie faisant directement suite à une séquence observée est relativement contrainte par le phénomène d'autocorrélation (les périodes pluvieuses présentent en générale certaines similitudes tant au niveau temporel que des hauteurs de pluie). Un comportement similaire est observé pour la variable climatique (ETP).

Nous allons décrire dans un premier temps les différentes étapes qui aboutissent à la création des générateurs de pluie et d'ETP à partir de la détermination des fonctions caractéristiques. Dans un second temps, nous présenterons les résultats statistiques obtenus au moyen du modèle prévisionnel de la source de Cent Fonts, à partir d'un grand nombre de relations pluie-débit. De cette analyse, on présentera, pour différentes périodes de l'année, la valeur de débit de la source des Cent Fonts pour différentes probabilités d'occurrence (contextes hydrologiques déficitaire, très déficitaires, excédentaire, etc.)

b) Générateur de pluie de Tempo

L'option « générateur de pluie » du logiciel Tempo a été utilisée dans cette étude afin de générer de manière stochastique des scénarios de pluie (qui ont les mêmes caractéristiques que la pluie observée). La chronique de pluie observée est celle déterminée précédemment à l'aide de l'option de pondération du logiciel (cf. § 3.1.2).

• Conditions d'application

Le générateur de pluie de TEMPO permet de générer une ou des séquences de pluie à partir d'une série observée. La séquence générée peut prolonger la série observée si la date du début de la série simulée correspond à la fin de la série observée.

La simulation d'une séquence de pluie doit satisfaire plusieurs conditions, tant au niveau de la distribution des hauteurs de pluie que des propriétés temporelles des divers événements qui se succèdent. Ce sont :

- la probabilité marginale des hauteurs de pluie (sans considération de distribution dans le temps). La loi de distribution empirique peut éventuellement être remplacée par une loi log-normale ou de Gumbel, lorsque le niveau de confiance calculé à partir du test de Kolmogorov le permet (ce niveau doit au moins être égal à 80% pour que la substitution soit possible). Très souvent la loi empirique régissant les précipitations est significativement différente de l'une de ces 2 lois, ce qui est le cas dans la présente étude (Illustration 13). Ce résultat s'explique en raison de la loi de distribution observée qui est bi-modale (Illustration 14),
- la fonction d'autocorrélation des événements (Illustration 15), observés et simulés doit être vérifiée,
- la loi d'échelle définie à partir de ses 3 premiers moments. Cette loi d'échelle suppose la validité de la relation suivante, pour chaque k (ordre) :

$$M_j(k.dt) = k^{\lambda(j)} \cdot M_j(dt)$$

où le moment $M_j(k.dt)$ est la somme, sur le segment de temps $k.dt$, des hauteurs de pluie élevées à la puissance j . Seules les hauteurs de pluie strictement positives sont comptabilisées de manière à considérer la moyenne des hauteurs de pluie (sinon on aurait un résultat trivial $\lambda(1)=1$ car $M_j(dt)$ représenterait la hauteur de pluie moyenne).

Chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doit être voisin de ceux calculés à partir de la série observée. Cette condition est vérifiée dans cette étude (Illustration 16). Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments $k.dt$ correspondant à 1, 2, 8, 16 et 32 jours. Elle a pour but de structurer la manière dont les hauteurs de pluie varient sur des segments de temps de longueur variable. La notion de moment appliquée aux séries temporelles peut être rapprochée des moments associés aux variables aléatoires : le premier moment est la moyenne, le second moment centré est caractéristique de la dispersion (variance) et permet la structuration des hauteurs de pluie sur différentes période de temps, le troisième moment est caractéristique de l'asymétrie de la loi de probabilité associée à la variable aléatoire.

- la saisonnalité des pluies doit être reproduite (cf. Illustration 14),
- la variabilité de la pluie annuelle cumulée, si les périodes d'observation et de simulation couvrent chacune au moins 5 années. Dans notre étude, la période d'observation couvre 10 ans (1995-2005), la période de simulation couvre également 10 ans (2006-2016). D'autre part, la simulation de la variabilité inter-annuelle des pluies ne peut être réalisée que si les périodes d'observation et de simulation sont contiguës et si la saisonnalité des pluies est intégrée dans le simulateur.

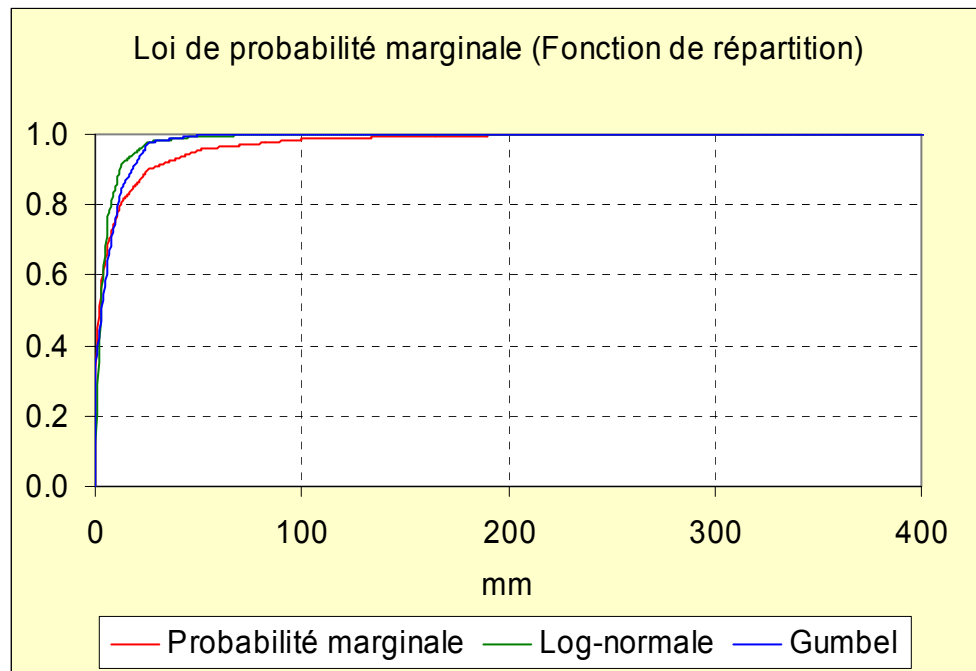


Illustration 13 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et des lois Log-Normale et Gumbel de la chronique de pluie de l'impluvium karstique des Cent Fonts.

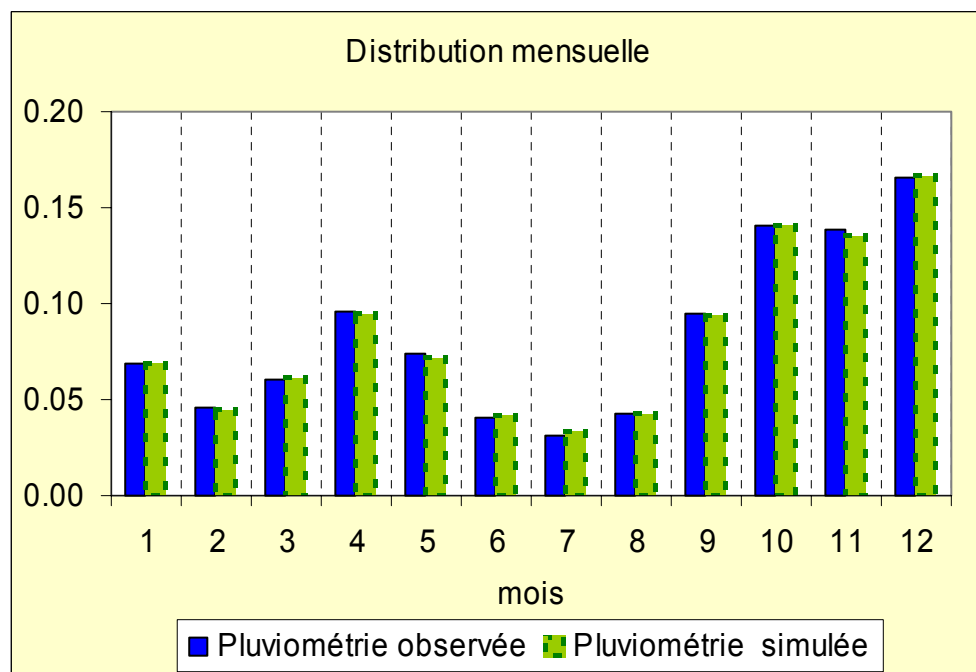


Illustration 14 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : histogramme de la distribution mensuelle de la pluie déduit des observations et de la simulation.

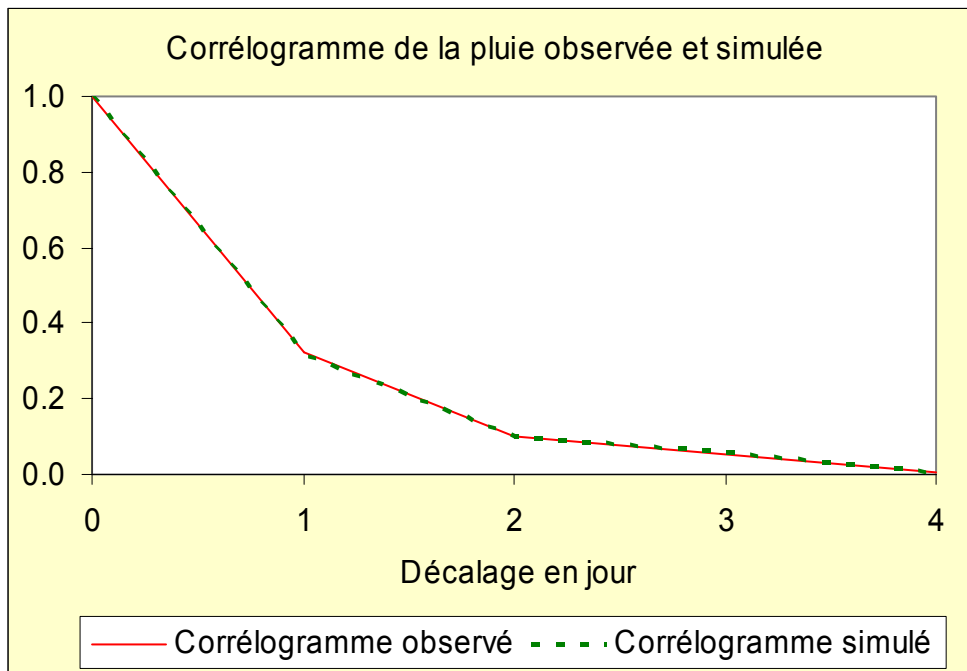


Illustration 15 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : corrélogramme de la pluie déduit des observations et des simulations.

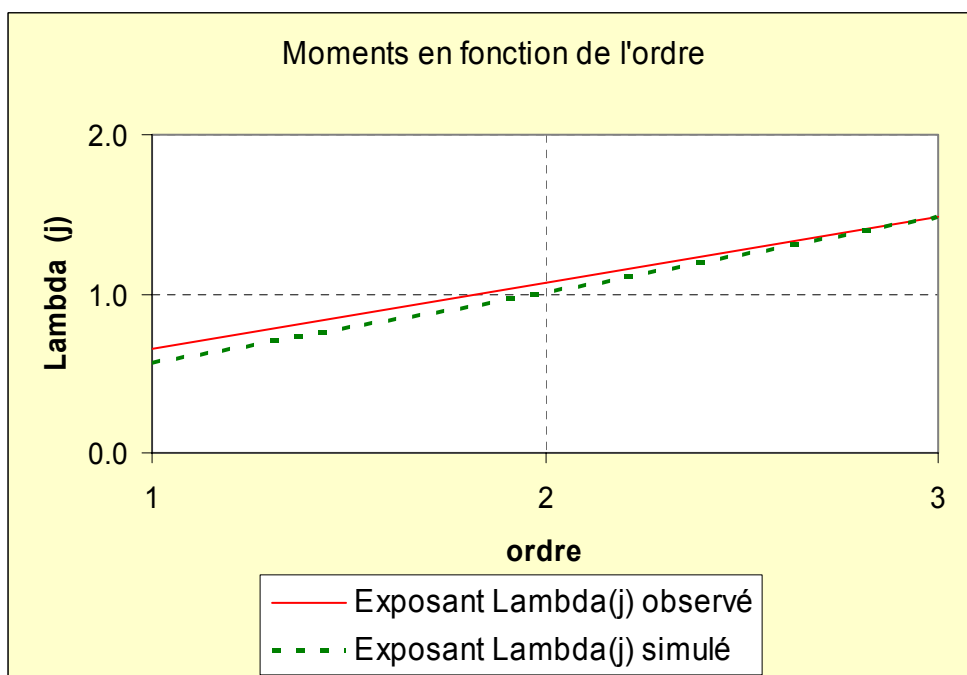


Illustration 16 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts: représentation des moments en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations.

• Principe de la simulation de chronique de pluie.

La séquence de pluies est générée de la manière suivante. Une période de temps T est définie (la série simulée peut succéder à la séquence observée, mais ce n'est pas obligatoire) :

- à chaque événement est affectée une hauteur de pluie tirée au hasard à partir de la distribution marginale empirique qui résulte des observations. On obtient ainsi une séquence de pluie dont les hauteurs sont distribuées à la manière de la série observée, mais qui ne présente aucune structure temporelle (distribution marginale),
- les événements sont distribués suivant une loi uniforme sur la période T, jusqu'à ce que la moyenne annuelle de la hauteur de pluie simulée soit égale à la moyenne annuelle de la hauteur de pluie observée sur la période T,
- ces événements sont organisés en réalisant des permutations successives (ces permutations affectent de la même manière les 'non événements' correspondant à l'absence de pluie). Ces permutations visent à minimiser une fonction « objectif » choisie de telle sorte que les différents critères qui définissent la structuration temporelle de la série simulée se rapprochent de ceux qui caractérisent la série observée. Toute permutation qui améliore la structure temporelle, ce qui se traduit par une décroissance de la fonction objectif, est entérinée. Dans le cas contraire, la permutation n'est entérinée qu'avec la probabilité :

$$\exp[(\text{Objectif}_0 - \text{Objectif}) / \text{« Température »}]$$

où la différence $\text{Objectif}_0 - \text{Objectif}$ mesure la 'dégradation' des propriétés temporelles de la série simulée (différence des fonctions objectif avant et après permutation). La « température » est un nombre qui décroît régulièrement, après que l'équilibre thermodynamique du système ait été constaté (cet équilibre est atteint lorsque les permutations qui se réalisent effectivement, laissent la fonction objectif inchangée). Ce 'refroidissement' permet de minimiser la fonction objectif progressivement, tout en évitant d'atteindre un minimum local, condition qui bloquerait l'évolution du système.

Cette diminution progressive de la « température » confère à ce générateur une analogie complète avec la technique du recuit bien connue des métallurgistes. Ce générateur est d'autant plus performant que la série à simuler contient un grand nombre d'événements, ce qui autorise un grand nombre de permutations.

En règle générale, plusieurs centaines d'événements sont nécessaires pour assurer un bon accord entre les propriétés temporelles des séries simulées et observées. La longueur de la série observée doit donc couvrir plusieurs années lorsqu'elle présente une saisonnalité marquée. Ceci se vérifie en particulier lors de la génération directe d'une séquence de pluie efficace, sans passer par son calcul à partir de l'ETP.

La technique du recuit⁴, basée sur la minimisation d'une fonction objectif (algorithme de Metropolis - Hastings, 1953, 1970) à partir de permutations successives d'événements, se prête particulièrement bien à la génération de chroniques de pluie. Une séquence simulée peut faire suite à une séquence observée, la continuité, entre les 2 séquences résultant de la structure temporelle commune aux séries observées et simulées.

Un exemple de résultat de simulation obtenu par le générateur de pluie est présenté sur l'illustration 17.

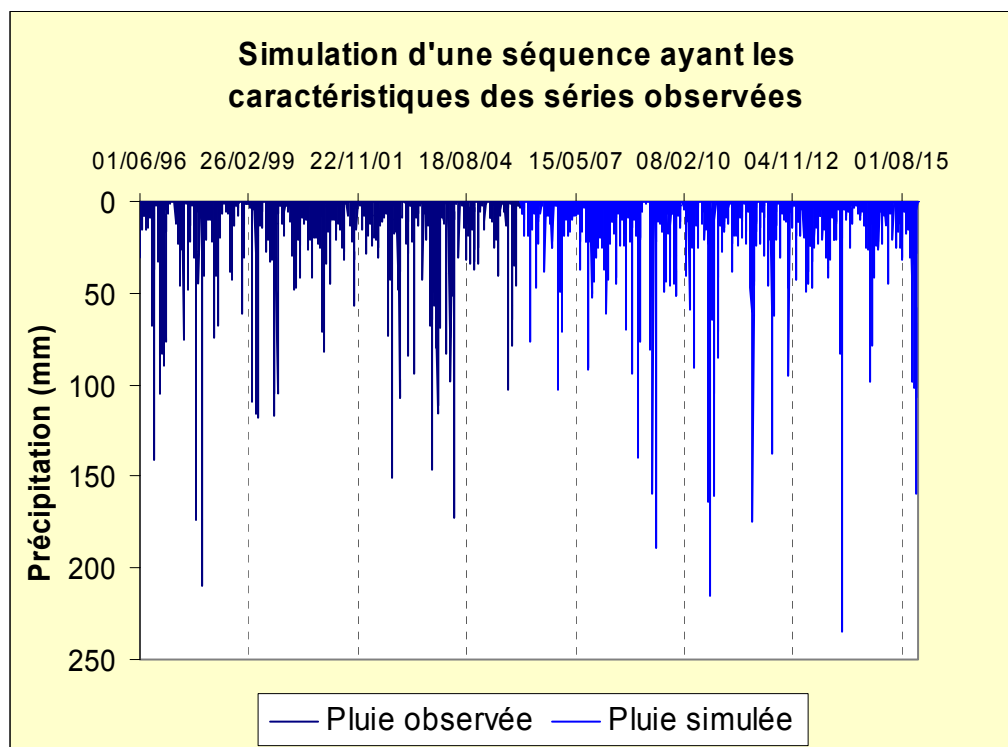


Illustration 17 - Générateur de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques de la série observée : Exemple du run 3

Nota :

L'illustration 17 représente la pluviométrie journalière mesurée (01/01/1996 au 31/12/2005) et la pluviométrie journalière d'une séquence de pluie journalière générée pour une période de 10 ans (01/01/2006 au 31/12/2016). La compression de l'échelle des abscisses ne permet pas de visualiser les jours sans précipitations.

⁴ La technique du recuit peut toutefois nécessiter des moyens de calcul importants car, pour posséder les caractéristiques de la pluie observée, un nombre relativement important d'événements doit être simulé pour permettre de nombreuses combinaisons de permutation, quelque soit la longueur de la période de temps..

Les chroniques de pluie générées ne peuvent en aucun cas être considérées comme des prévisions météorologiques pour la période 2006-2016. Elles sont générées dans le seul but d'étudier le comportement du système karstique pour différents contextes hydroclimatiques qui pourraient se produire compte tenu des propriétés caractéristiques des pluies du secteur d'étude déduites des observations.

c) Générateur d'ETP de Tempo

Le générateur d'ETP de TEMPO permet de générer une séquence d'ETP à partir d'une série observée. La séquence générée peut prolonger la série observée si la date du début de la série simulée correspond à la fin de la série observée.

• Condition et principe de la simulation de l'ETP

De manière similaire au générateur de pluie, c'est la technique du recuit qui est utilisée pour générer des séquences d'ETP. Il s'agit en fait de générer le 'bruit' constitué par les variations autour d'une valeur moyenne mensuelle (Illustration 18). Puisque ces écarts sont toujours structurés temporellement, la technique du recuit permet de faire en sorte que les fonctions d'autocorrélation et de corrélation croisée⁵ « Variable climatique – Pluie » des séries observées et simulées soient les plus proches possibles l'une de l'autre (Illustration 19), de même que les variations mensuelles observées et simulées de l'écart - type du bruit (Illustration 20).

De manière similaire au générateur de pluie, les 3 premiers moments sont calculés (Illustration 21) à partir de la valeur absolue du bruit (les écarts de la variable climatique par rapport à la moyenne mensuelle étant positifs ou négatifs, le calcul des moments à partir de la valeur algébrique du bruit conduirait à des valeurs tendant vers 0 lorsque la période d'observation augmente car les écarts ont tendance à s'équilibrer. Le calcul des exposants $\lambda(j)$ perdrait alors tout son sens, car on serait en présence de formes indéterminées, (voir 'Générateur de pluie'). Chacun des exposants $\lambda(j)$ relatifs aux différents moments j de la série simulée doivent être voisins de ceux calculés à partir de la série observée, ce qui est vérifié dans cette étude (cf. Illustration 21). Cette loi d'échelle est appliquée sur les segments correspondant à 1, 2, 8, 16 et 32 jours. Contrairement à la pluie dont le premier moment est inférieur à 1, l'exposant $\lambda(1)$ est ici voisin de 1, ce qui signifie que l'ETP peut s'écarter de la moyenne mensuelle aussi longtemps que dure la période d'observation (alors que la pluie cesserait nécessairement).

C'est la loi de probabilité marginale du bruit qui a été utilisée dans cette étude dans la mesure où la loi empirique est significativement différente de la loi normale (Illustration 22).

⁵ La fonction de corrélation croisée ETP - Pluie est considérée pour des décalages à la fois positifs et négatifs, ce qui permet de simuler aussi bien une relation causale de la température de l'air sur la pluie que de la pluie sur la température.

Un exemple de résultat de simulation obtenu par le générateur d'ETP est présenté sur l'illustration 23.

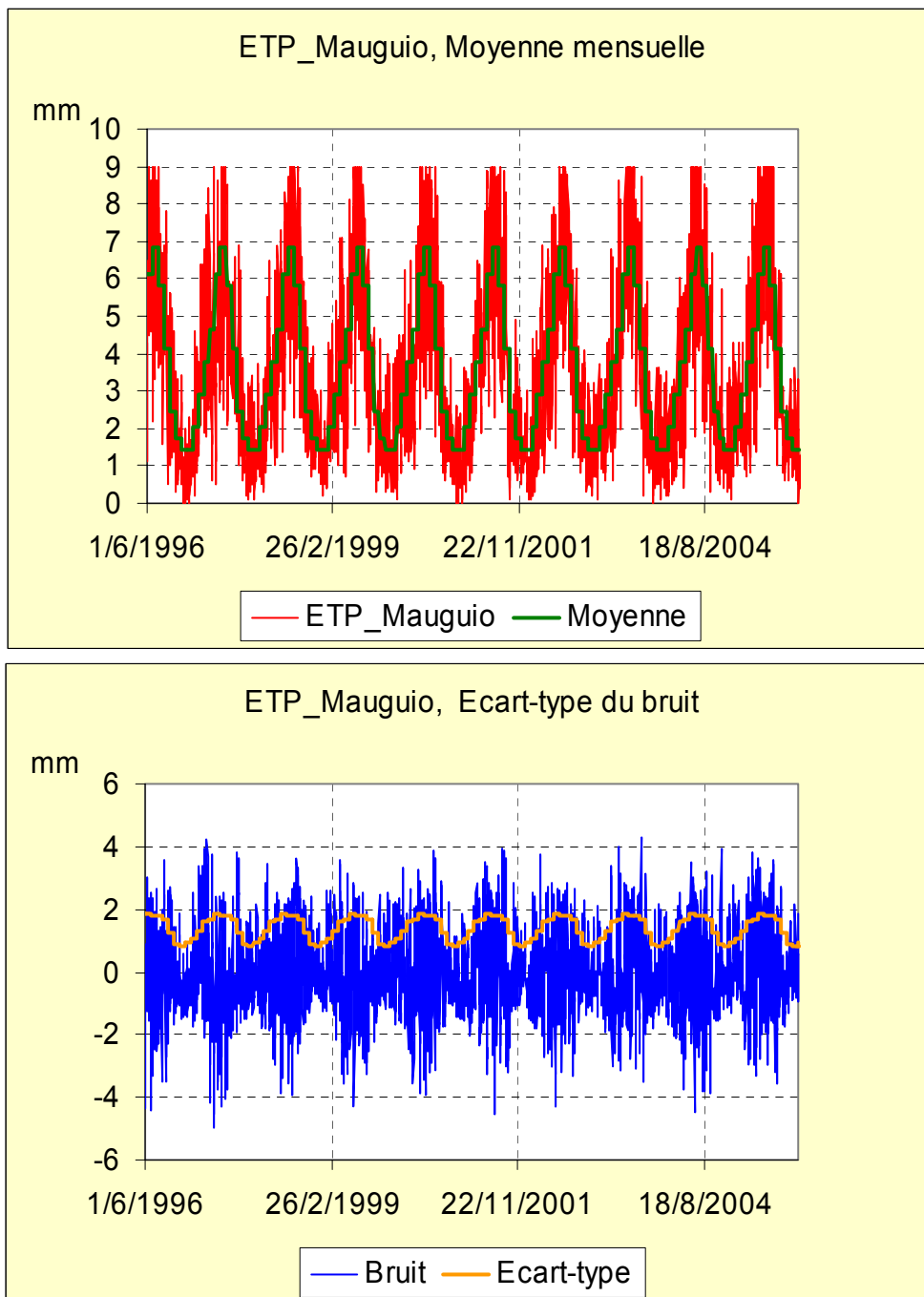


Illustration 18 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de l'ETP journalière (Données Météo France, station Montpellier Fréjorgues), de l'ETP moyenne mensuelle, de l'écart-type et du bruit (fonction aléatoire).

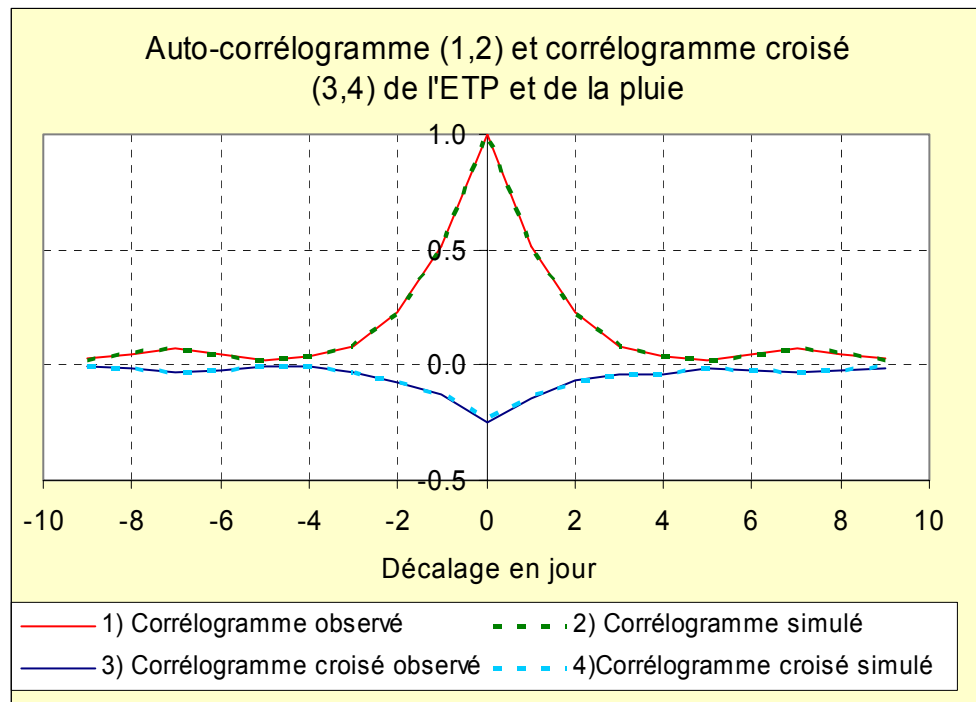


Illustration 19 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : corrélogramme de l'ETP déduit des observations et des simulations et corrélogramme croisé ETP – Pluie déduit des observations et des simulations

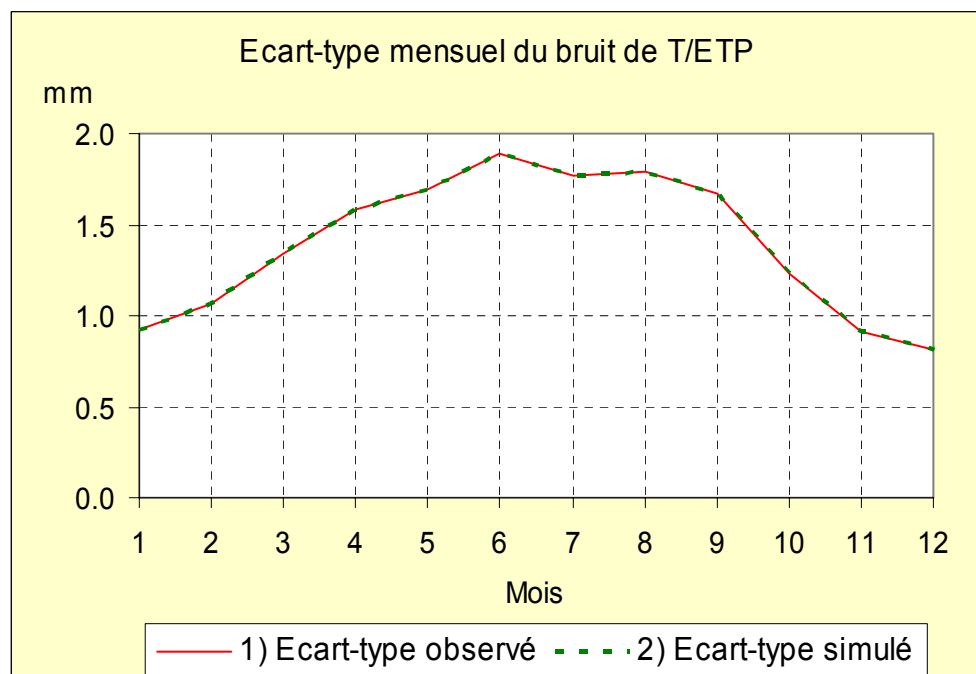


Illustration 20 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : écart-type mensuel du bruit de l'ETP déduit des observations et des simulations.

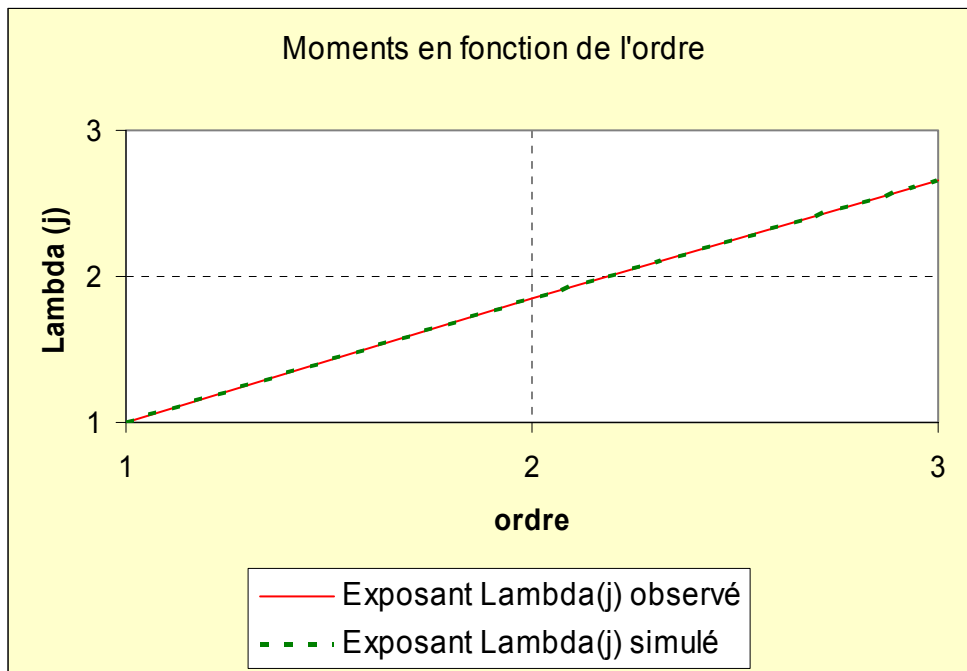


Illustration 21 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation des moment en fonction de l'ordre obtenus à partir des observations et des simulations.

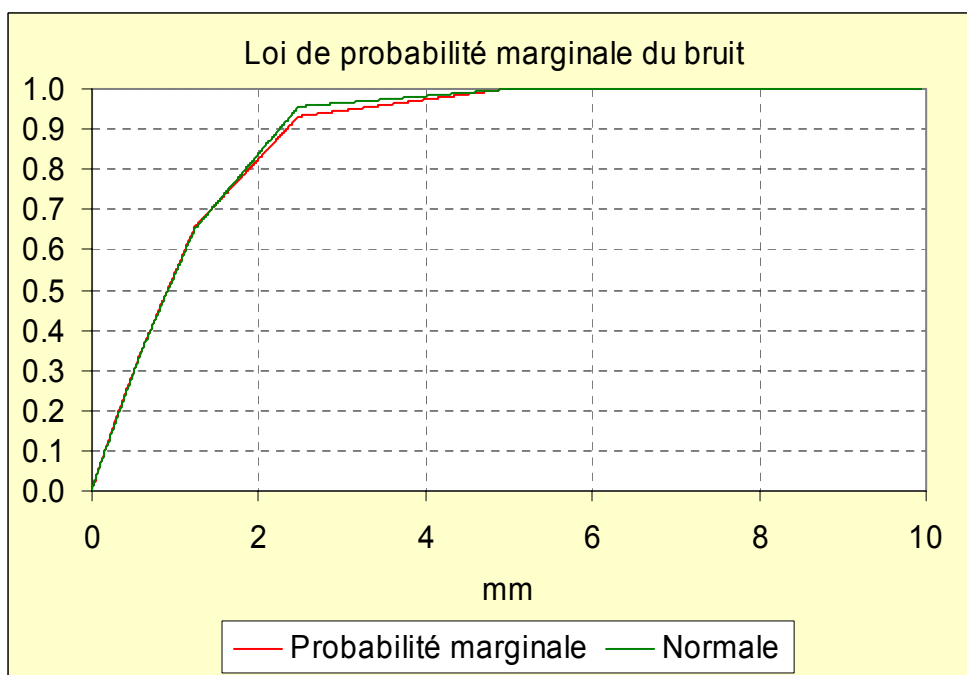


Illustration 22 - Générateur d'ETP du modèle Cent Fonts : représentation de la loi de probabilité marginale (loi empirique) et de la loi Normale.

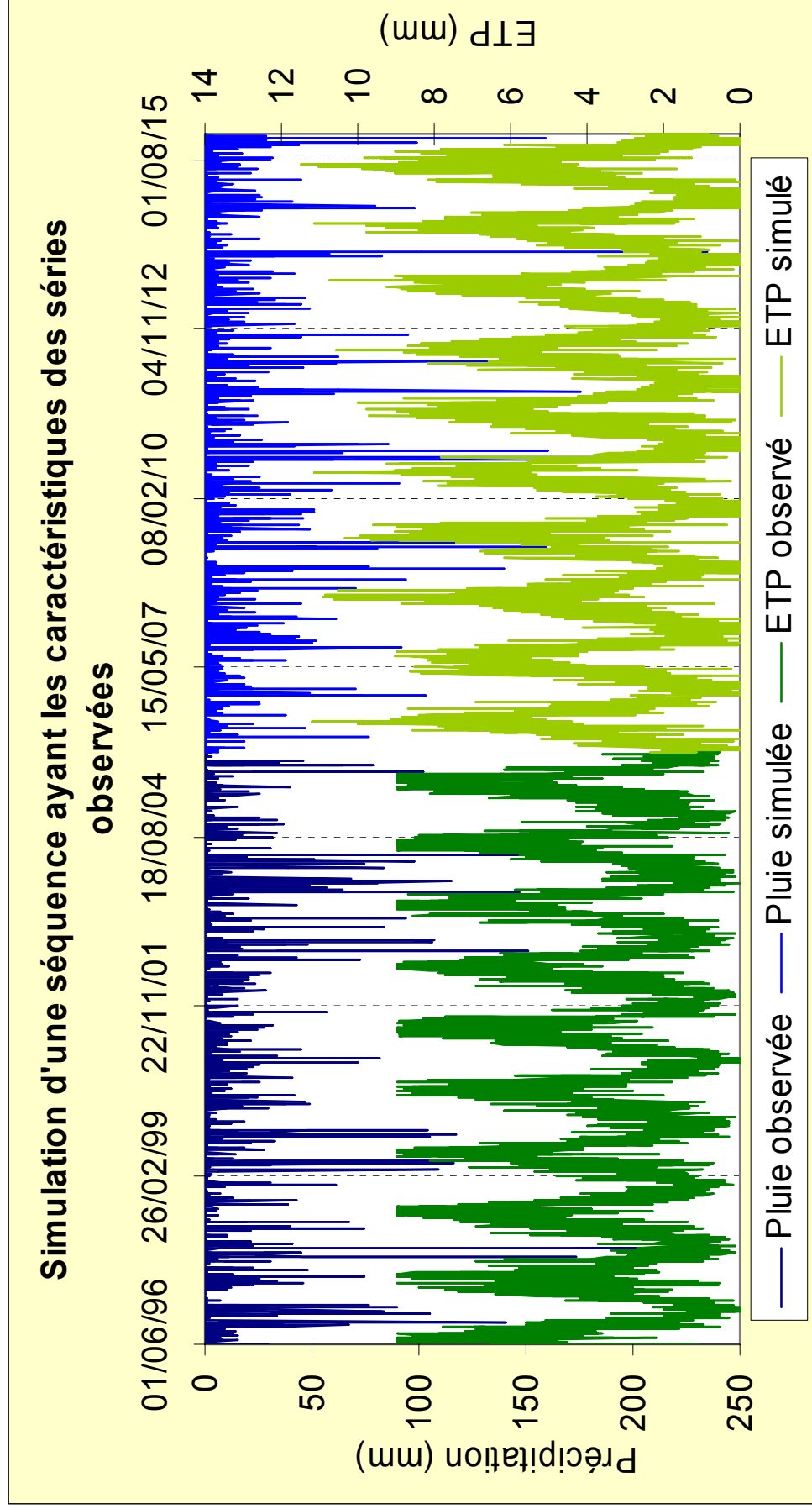


Illustration 23 - Générateur d'ETP et de pluie du modèle Cent Fonts : exemple de résultat d'une simulation d'une séquence d'ETP et de pluie (au pas de temps journalier) ayant les caractéristiques des séries observées : Exemple du run 3

d) Période de calibration des modèles

Pour la période antérieure au 31/12/2005, la calibration des différents modèles (modèle de transfert de la Buèges, modèle de transfert du débit naturel des Cent Fonts et modèle de transfert de la piézométrie cf. Illustration 6) a été réalisée sur la base des données d'entrée mesurées (Pluie, ETP, débit de pertes de la Buèges, débit des Cent Fonts, niveau piézométrique des Cent Fonts, débit de pompage et de l'Hérault mesurés lors du pompage d'essai de 2005). Les résultats des sous modèles de transfert de débit sont présentés et commentés au sein des paragraphes suivants. Les résultats du modèle de transfert « piézométrie » sont exposés et discutés dans le chapitre 4.

e) Période de prévision des modèles de transfert en mode prévisionnel

Pour la période postérieure au 31/12/2005, et dans une optique d'étude d'un grand nombre de situations hydrologiques contrastées, les débits des pertes de la Buèges et des Cent Fonts ont été estimés à partir des chroniques de pluie et d'ETP générées de manière stochastique à l'aide de l'option de génération des pluies et d'ETP de l'outil Tempo.

3.1.4. Commentaire des résultats obtenus au moyen des modèles de transfert de débit en mode prévisionnel

Les différentes fonctions caractéristiques modélisées par les générateurs de pluie et d'ETP sont comparables aux fonctions caractéristiques déduites des observations. Notons que les valeurs extrêmes des chroniques d'ETP générées depuis le 01/01/2006 apparaissent légèrement supérieures aux valeurs extrêmes mesurées (2 mm/j tout au plus sur les valeurs maximales des mois d'été). Cette différence constatée en période estivale, au cours desquels la recharge est nulle en raison d'absence de précipitation importante n'a aucun impact sur les résultats des simulations.

Les générateurs de pluie et d'ETP ont été utilisés pour générer 3 chroniques de 10 ans (période 2006-2016) ; dénommées ci-après run 1, run 2 et run 3.

Les chroniques de pluie et d'ETP ainsi générées ont ensuite été utilisées (en tant qu'entrées des sous modèles) par les différents modèles de transfert de débits afin de déterminer, de manière prévisionnelle, les débits des pertes de la Buèges et des Cent Fonts (débits naturels non influencés par les pompages).

Le run 1 de pluie et d'ETP (période 2006-2016) permet donc de déterminer une chronique de débit des Cent Fonts (QCF_run 1) de 10 ans. De la même façon, on détermine une chronique de débit des pertes (Qpertes_run 1) de 10 ans. Les run 2 et 3 (période 2006-2016) de pluie et d'ETP permettent également de générer des chroniques de débit de 10 ans (QCF_run 2, QCF_run 3, Qpertes_run 2 et Qpertes_run 3).

La synthèse des résultats globaux obtenus pour chaque cycle hydrologique modélisé sur la période (2006-2016) est présentée au sein du Tableau 2. Le cycle hydrologique 2005-2006 du run 3 apparaît extrêmement déficitaire. Les valeurs de ce cycle sont comparables aux valeurs mesurées au cours du cycle 2004-2005. Les valeurs des autres cycles simulées permettent d'encadrer les valeurs observées au cours de la période 1997-2005. Des cycles excédentaires, déficitaires ou « normaux » sont donc représentés dans chacune des chroniques générées au moyen de l'approche de modélisation Tempo.

Tableau 2 - Pluviométrie moyenne, débit moyen des pertes de la Buèges et des Cent Fonts calculé pour les différents cycles hydrologiques modélisés.

	Cycle 01/09 au 31/08 de l'année suivante	Pluie (mm)	Qmoy Pertes (l/s)	Qmoy Cent Fonts (l/s)
mesuré	1997-1998	1448		1361
mesuré	1998-1999	1019		773
mesuré	1999-2000	1236	494	751
mesuré	2000-2001	1167	619	1271
mesuré	2001-2002	792	499	764
mesuré	2002-2003	1393	522	1292
mesuré	2003-2004	2153	808	2029
mesuré	2004-2005	600	279	484
run 1	2005-2006	986	343	957
run 1	2006-2007	1102	452	861
run 1	2007-2008	1090	506	989
run 1	2008-2009	1020	432	941
run 1	2009-2010	1850	901	1790
run 1	2010-2011	1357	615	1371
run 1	2011-2012	1053	409	929
run 1	2012-2013	1305	522	1059
run 1	2013-2014	1718	799	1634
run 1	2014-2015	1116	492	1074
run 2	2005-2006	1666	618	1439
run 2	2006-2007	1363	658	1400
run 2	2007-2008	1785	789	1686
run 2	2008-2009	1304	530	1187
run 2	2009-2010	639	279	708
run 2	2010-2011	1054	440	941
run 2	2011-2012	1169	491	1035
run 2	2012-2013	1024	426	970
run 2	2013-2014	1079	420	939
run 2	2014-2015	1399	589	1256
run 3	2005-2006	600	298	489
run 3	2006-2007	1034	452	886
run 3	2007-2008	1402	506	1108
run 3	2008-2009	1310	432	1155
run 3	2009-2010	1130	901	1003
run 3	2010-2011	1754	615	1669
run 3	2011-2012	1401	409	1264
run 3	2012-2013	967	522	836
run 3	2013-2014	1104	799	1052
run 3	2014-2015	1183	492	975

Nous avons dans un second temps utilisé le sous modèle de transfert des débits des Cent Fonts pour étudier, à un instant donné, l'évolution que pourrait présenter le système lorsque celui-ci est soumis à telle ou telle condition hydroclimatique. Pour ce faire, nous avons étudié de manière statistique les résultats d'un grand nombre de relations pluie-débit : 500 chroniques de débit ont été calculées à partir de 500 chroniques de pluie efficaces déterminées par l'approche stochastique (utilisation des générateurs de pluie et d'ETP).

Une manière de représenter la probabilité d'occurrence 'P' du débit modélisé consiste à faire une partition de la population statistique constituée par l'ensemble des valeurs prises par le débit au temps t. Cette partition est opérée de telle sorte que l'effectif N (nombre de réalisations) soit divisé en deux populations de taille respective P.N et (1-P).N. Cette partition de l'effectif de la population statistique est représentée pour chaque pas de temps.

Cette représentation en fonction du temps est très utilisée pour mettre en évidence la probabilité d'occurrence de certains phénomènes tels que les crues ou les étiages. Dans le cas où $P=0.5$, le quantile divise la distribution statistique en deux parties d'effectifs égaux : il s'agit dans ce cas de la médiane. Lorsque P est choisi respectivement égal à 0.25 et 0.75, les quantiles divisent la population statistique en quatre parties d'effectifs égaux : ce sont les quartiles : 1^{er} quartile 0.25 = probabilité d'occurrence = 4 ans sec ; 4^{ème} quartile (0.75) = probabilité d'occurrence = 4 ans humide. Lorsque l'on cherche à représenter des événements exceptionnels, on choisira P proche de 0 ou de 1.

Nous présentons au sein du Tableau 3 et sur l'illustration 24 les résultats de cette analyse statistique. Il ressort de cette analyse que les débits de la source des Cent Fonts mesurés en 2005 correspondent à une situation d'étiage « trentenal sec ». Ces résultats corroborent ceux présentés dans le rapport BRGM/RP-54426 qui indiquent, sur la base des informations de pluie, que le cycle 2005 était représentatif d'une sécheresse de type « trentenal ».

Les résultats obtenus (Tableau 3 et Illustration 24) ont permis de qualifier la nature des contextes hydrologiques modélisés (run 1, run 2 et 3). Les statistiques descriptives des mois d'été des cycles modélisés (pertes et Cent Fonts) sont présentées en annexe 2.

Pour les résultats du Run 3 par exemple, la probabilité d'occurrence des situations hydrologiques des mois d'été (juin à août) des cycles suivants pour les Cent Fonts sont :

- cycle 2005-2006 : probabilité d'occurrence de type « trentenal » sec,
- cycle 2006-2007 : probabilité d'occurrence de type supérieur à « trentenal » sec,
- cycle 2013-2014 : probabilité d'occurrence de type 10 ans secs,
- cycle 2009-2010 : probabilité d'occurrence de type d'année médiane.

Les informations de débit des Cent Fonts pour différents contextes hydrologiques (probabilité d'occurrence de type supérieur à « trentenal » sec, « trentenal » sec, 10 ans secs et année médiane) ont été utilisées dans l'approche de modélisation à l'aide du modèle réservoir couplé à une solution analytique afin d'étudier l'évolution du système pour différents scénarios de pompage. Les modifications apportées au modèle décrit dans le précédent rapport (BRGM/RP 54426-FR, Ladouche et al., 2005) sont présentées dans le paragraphe 3.2.

Résultats du processus stochastique : 500 tirages Evolution temporelle des débits en fonction de la probabilité d'occurrence

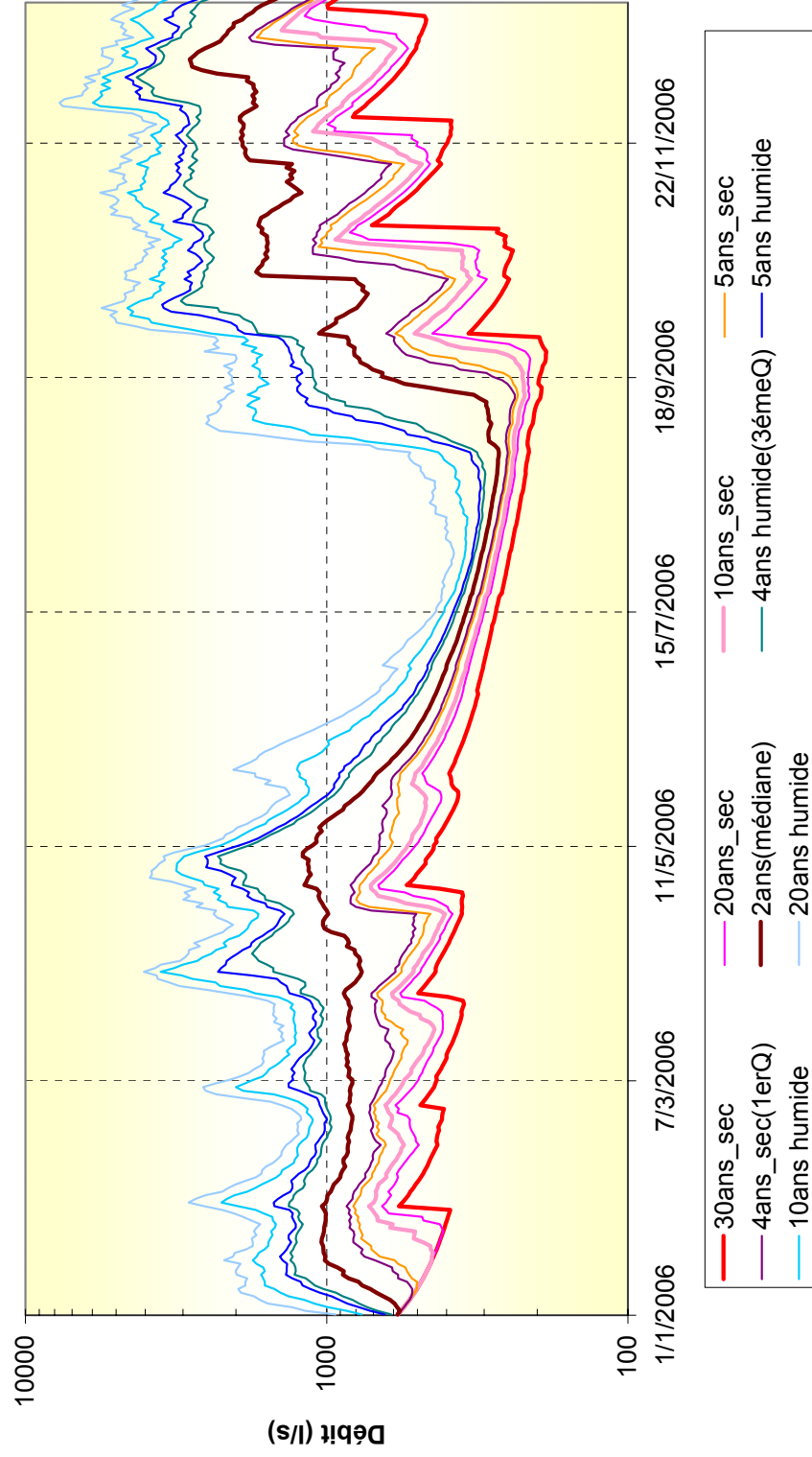


Illustration 24 - modèle de transfert des débits des Cent Fonts en mode prévisionnel : Représentation des débits de la sources pour différentes probabilités d'occurrence (echelle semi- logarithmique)

Tableau 3 - stastistiques descriptives des débits (exprimés en l/s) des Cent Fonts pour les mois d'été en fonction de la probabilité d'occurrence

	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin	juin
	30ans_sec	20ans_sec	10ans_sec	5ans_sec	4ans_sec (1erQ)	2ans (médiane)	4ans humide (3èmeQ)	5ans humide	10ans humide	20ans humide	juillet	juillet	juillet
moyenne	336	387	403	434	445	494	590	630	802	1069			
2sigma	25	40	45	56	59	76	113	133	237	452			
min	302	336	345	366	373	400	448	462	524	582			
1erQ	315	353	366	388	397	431	492	511	590	672			
médiane	331	377	396	423	432	476	568	608	741	911			
3èmeQ	355	415	434	470	485	544	677	740	988	1411			
max	386	471	495	554	572	659	823	880	1253	2043			

	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet	juillet
	30ans_sec	20ans_sec	10ans_sec	5ans_sec	4ans_sec (1erQ)	2ans (médiane)	4ans humide (3èmeQ)	5ans humide	10ans humide	20ans humide	juillet	juillet	juillet
moyenne	272	298	305	320	325	344	372	380	413	461			
2sigma	17	20	21	24	25	27	36	38	53	74			
min	247	269	275	285	289	305	323	329	348	378			
1erQ	257	280	286	298	303	321	341	348	366	407			
médiane	273	298	304	318	323	342	367	376	405	432			
3èmeQ	286	315	322	340	345	365	398	409	449	511			
max	300	334	342	364	369	396	443	455	522	628			

	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout	Aout
	30ans_sec	20ans_sec	10ans_sec	5ans_sec	4ans_sec (1erQ)	2ans (médiane)	4ans humide (3èmeQ)	5ans humide	10ans humide	20ans humide	Aout	Aout	Aout
moyenne	226	247	252	262	265	282	311	325	386	482			
2sigma	10	11	11	12	11	11	18	28	82	146			
min	213	232	238	246	251	268	297	308	341	380			
1erQ	218	238	242	251	254	272	301	312	346	402			
médiane	226	246	252	260	264	281	305	315	362	439			
3èmeQ	234	255	260	270	274	290	314	325	377	487			
max	244	266	272	283	286	302	384	445	741	1146			

	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre
	30ans_sec	20ans_sec	10ans_sec	5ans_sec	4ans_sec (1erQ)	2ans (médiane)	4ans humide (3èmeQ)	5ans humide	10ans humide	20ans humide	Septembre	Septembre	Septembre
moyenne	203	235	264	320	352	539	963	1124	1668	2204			
2sigma	27	50	79	123	145	249	319	320	274	258			
min	186	211	220	232	237	284	402	464	831	1413			
1erQ	193	214	224	240	246	291	681	961	1641	2057			
médiane	197	219	231	247	253	506	1091	1219	1709	2214			
3èmeQ	205	229	239	269	277	777	1183	1308	1770	2343			
max	338	446	511	592	635	1061	1692	1874	2419	2802			

3.2. DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE MODELISATION A L'AIDE DU MODELE DE RESERVOIR COUPLE A UNE SOLUTION ANALYTIQUE (MODELE PRESENTE DANS LE RAPPORT BRGM/RP-54426-FR)

3.2.1. Rappel du principe du modèle

Face à la complexité d'une part de la géométrie du système karstique sollicité par le pompage d'essai et d'autre part des écoulements générés (contribution des pertes de la Buèges, des blocs fissurés et des systèmes annexes au drainage, du déstockage dans les drains ou de la rivière Hérault), une approche de modélisation mathématique du pompage d'essai a été mise en œuvre (Ladouche et al., 2005 BRGM/RP 54426-FR).

Elle a été implémentée dans le logiciel de calcul MATLAB au moyen du module de simulation SIMULINK.

Le modèle est décrit dans le précédent rapport (BRGM/RP 54426-FR, Ladouche et al., 2005). Seules les modifications apportées au modèle sont décrites dans le présent rapport.

3.2.2. Description du modèle

Le modèle mathématique a été conçu de façon à reproduire au mieux la physique des phénomènes telle qu'elle est connue à ce jour au sein du système karstique des Cent Fonts.

En dehors des périodes de pompage, le débit de la source correspond au débordement du drain karstique qui est alimenté par la contribution des réserves de l'aquifère, issues de la zone noyée et des pertes de la Buèges.

Lors du pompage d'essai, on considère que le débit pompé dans le drain karstique provient (Illustration 25):

- des pertes de la Buèges alimentant le drain karstique ;
- d'infiltrations de la rivière Hérault alimentant le drain karstique au sein de sa partie aval ;
- de la contribution des blocs de calcaires (et/ou dolomies) poreux et/ou fissurés, et/ou des systèmes annexes au drainage (SAD) situés entre les drains karstiques et alimentant ceux-ci ;
- du déstockage de l'eau contenue dans le drain karstique.

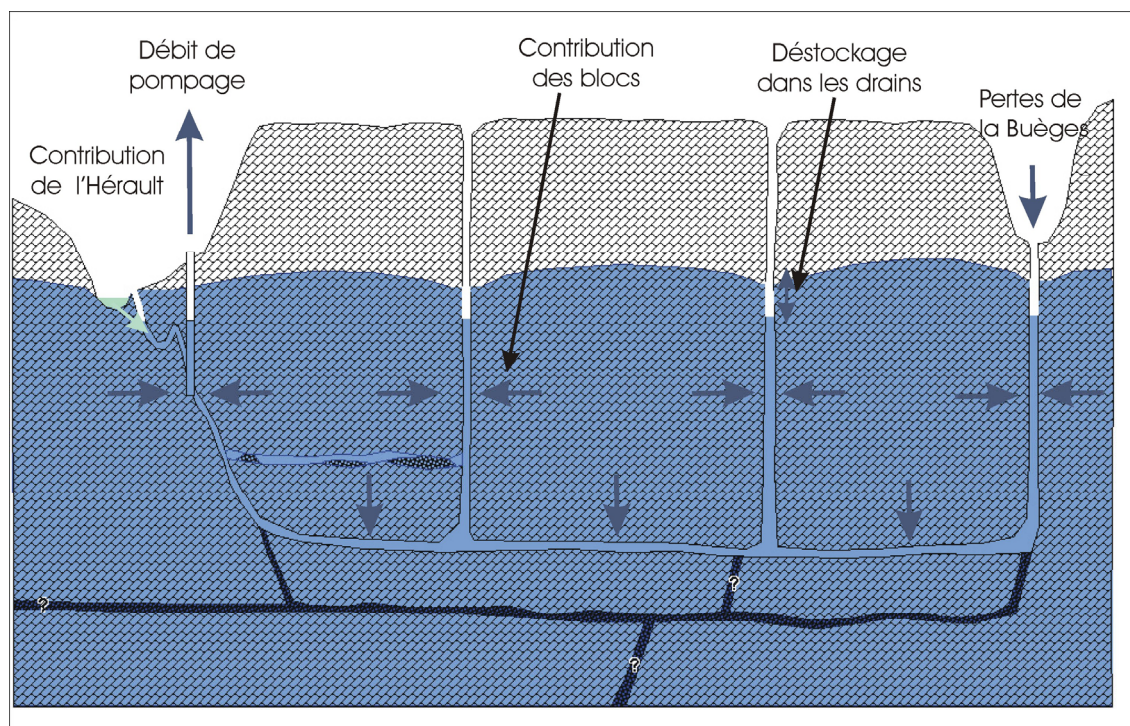


Illustration 25 - schéma de fonctionnement du système karstique des Cent Fonts au cours de la période de pompage

Il en résulte que le drain karstique, ou plus exactement le réseau de drains karstiques, constitue le réservoir qui est directement sollicité par le pompage. Il est alimenté par des écoulements d'origines diverses. Dès lors, le modèle mathématique repose sur un modèle conceptuel au cœur duquel est situé un réservoir sollicité et alimenté : il s'agit du ou des drains karstiques. Un second réservoir correspond aux blocs⁶ poreux et/ou fissurés, et/ou aux systèmes annexes au drainage. Il se vidange dans le réseau de drains karstiques au gré de l'évolution relative des charges hydrauliques dans les deux réservoirs.

Les pertes de charge quadratiques, de faible importance ($\sim 2\%$) au regard du rabattement total, n'ont pas été explicitement modélisées dans la mesure où il est illusoire de les localiser en l'absence d'une connaissance fine de la géométrie et des caractéristiques du drain karstique à l'échelle du bassin d'alimentation.

⁶ Le terme « bloc » ne préjuge pas de la nature karstique des vides alimentant le drain : fissures ou porosité de la matrice dolomitique ou systèmes annexes au drainage

3.2.3. Modifications apportées au modèle

Un certain nombre de modifications ont été apportées au modèle précédent d'une part pour améliorer la prise en compte de certains phénomènes naturels (vidange, relation système karstique et Hérault) et d'autre part pour permettre l'utilisation du modèle en mode de simulation d'exploitation du système sur une année hydrologique complète.

a) Vidange naturelle du système karstique

Dans le précédent modèle, la vidange naturelle du système était représentée par une loi de vidange de réservoir de type Maillet. Si cette solution a permis de modéliser le pompage d'essai d'août 2005 en période d'étiage lorsque le karst n'était pas alimenté par des pluies, elle ne peut être appliquée à des simulations de plus longue durée comportant des périodes de pluies. En effet, en période influencée (infiltration par les pluies efficaces et les pertes non négligeable) la récession répond à une loi mathématique plus complexe (cf. annexe 1).

L'interaction entre les blocs et les drains peut être scindée en deux parties, comme précédemment :

- la contribution naturelle des blocs aux drains (Q_{nat});
- la sollicitation des blocs par les drains (Q_{sol}).

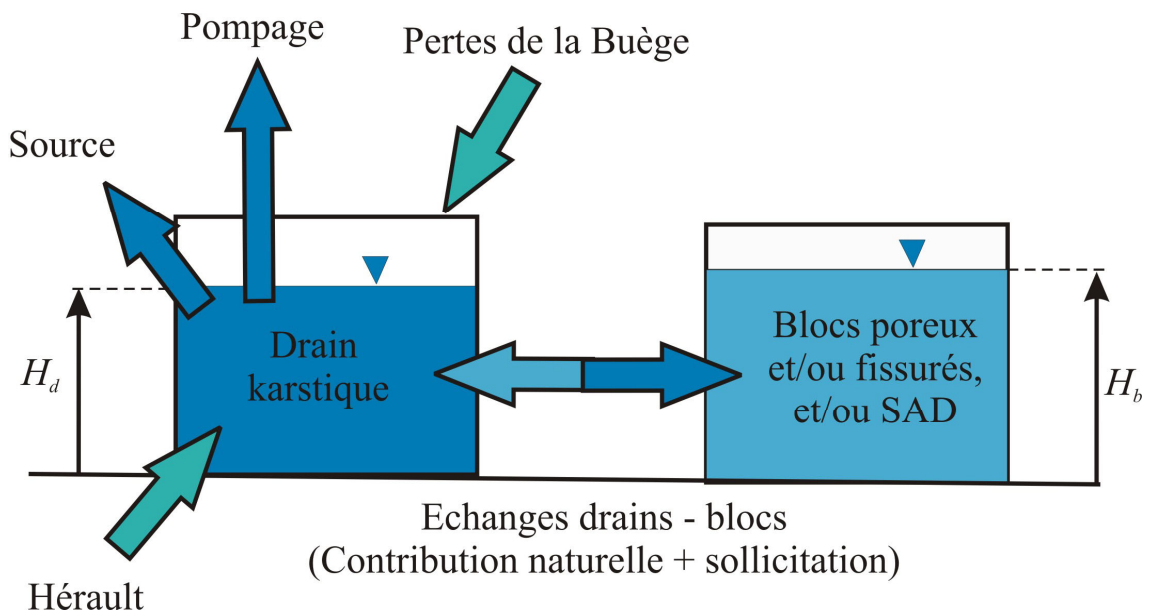


Illustration 26 - schématisation du modèle mathématique. H_b : charge hydraulique dans les blocs ; H_d : charge hydraulique dans le drain

Dès lors, le drain karstique est alimenté par (Illustration 26) :

- la contribution naturelle des blocs (Q_{nat});

- une sollicitation des blocs liée au rabattement dans le drain (Q_{sol}) ; celle-ci est nulle en l'absence de pompage et négative en période de remontée après pompage (le drain alimente alors les blocs) ;
- le débit Q_{pertes} des pertes de la Buèges ;
- le débit Q_h en provenance de la rivière Hérault lorsque le rabattement dans le drain est suffisant en période de pompage.

Le drain est sollicité par le débit de pompage (Q_{pomp}) et déborde à la source (Q_{source}).

En l'absence de pompage, $Q_{pomp} = 0$ et $Q_h = 0$. Le drain ne sollicite plus les blocs qu'en conditions naturelles et dès lors, le débit de la source vaut la somme des pertes de la Buèges et de la contribution naturelle des blocs. Ce total correspond au débit naturel de la source des Cent Fonts :

$$Q_{CF} = Q_{pertes} + Q_{nat}$$

En d'autres termes, la somme des débits des pertes de la Buèges et de la contribution naturelle des blocs aux drains, constitue le débit total naturel de la source des Cent Fonts, appelé Q_{CF} . Ce débit peut être simulé au moyen du modèle Tempo et constituer ainsi une entrée du modèle hydrodynamique.

b) Tarage du débit de la source

Dans le précédent modèle, le débit résultant à chaque pas de temps de la différence entre les volumes d'eau entrant et sortant des drains karstiques était considéré comme le débit de débordement du système et assimilé au débit de la source des Cent Fonts en cours de pompage. Dans la réalité, le drain karstique possède un rayon fini qui limite le débit de sortie du système par la source.

Le débit de la source est en réalité une fonction du niveau d'eau dans le drain karstique par rapport au niveau de base que constitue le niveau de la rivière Hérault. Dès lors, la courbe de tarage de la source, exprimée en fonction de la différence de niveau entre le drain et l'Hérault a été implémentée au sein du modèle.

La courbe de tarage telle que déterminée par ailleurs (annexe 3) et introduite dans le modèle est la suivante :

$$Q_{source} = 82.103 + 268.174(H_d - H_h) - 123.754(H_d - H_h)^2 + 43.093(H_d - H_h)^3$$

Avec H_d : niveau d'eau dans le drain, H_h niveau d'eau de l'Hérault et Q_{source} débit de la source (l/s).

Le niveau dans l'Hérault (H_h) est calculé sur base d'une relation établie entre H_h et le débit naturel des Cent Fonts Q_{CF} . (annexe 3)

$$H_h = 76.3 + 3.133 \cdot 10^{-4} Q_{CF} - 1.531 \cdot 10^{-8} Q_{CF}^2 + 1.20210^{-12} Q_{CF}^3$$

c) Relation système karstique – rivière Hérault

Les écoulements d'eau depuis la rivière Hérault vers le système karstique lorsque les niveaux d'eau baissent dans le drain karstique ont été exprimés de façon différente, plus proche de l'évolution déduite à partir du suivi de la conductivité des eaux pompées) et prenant en considération la gamme de variation de la contribution de l'Hérault au cours de l'essai de pompage, soit de 0 à 37 l/s au cours de l'essai de longue durée à 400 l/s (cf. illustration 52, rapport BRGM/Rp-54426-FR, Ladouche et al., 2005).

La relation implémentée dans le modèle est la suivante (Illustration 27) :

Niveau dans le drain	Infiltration de l'Hérault
Si $H_D > 76$ m NGF	$Q_h = 0$ l/s
Si $22.5 < H_D < 76$ m NGF	$Q_h = 30$ l/s
Si $H_D < 22.5$ m NGF	$Q_h = 36$ l/s

Illustration 27 - débit d'infiltration de l'Hérault en fonction du niveau dans le drain

d) Pas de temps

Le modèle initial fonctionnait en régime transitoire à pas de temps horaire avec $t = 0$ le 27/07/2005 à 06h00 (TU). Les données horaires utilisées correspondent à des moyennes horaires calculées à partir des données mesurées toutes les 5 minutes.

La prise en compte de forts débits d'entrée dans le drain karstique en période de crue, lorsque le débit naturel de la source Q_{CF} augmente rapidement, provoque des oscillations numériques. Celles-ci sont liées à la capacité réduite du drain à absorber, durant un pas de temps horaire, les fortes quantités d'eau qui s'infiltreraient alors dans le drain. Le pas de temps de calcul a dès lors été réduit à 0.3 heures, soit 18 minutes, de façon à éliminer ces oscillations.

3.2.4. Fonctionnement hydraulique des réservoirs

a) Hydraulique du réservoir « drain karstique »

Les deux réservoirs du nouveau modèle sont décrits ci-dessous.

• Fonctionnalités

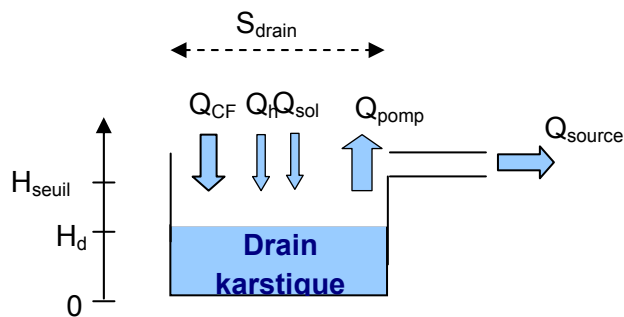
Ce réservoir correspond au réseau de drains karstiques connectés à la source des Cent Fonts et directement sollicité par le pompage d'essai. Il est alimenté par le

réservoir « blocs » (contribution naturelle + sollicitation) et par les flux provenant de l'Hérault et des pertes de la Buèges. Il est sollicité par le débit de pompage.

Il possède une fonction capacitive importante liée au stock d'eau situé dans les vides constituant le drain karstique.

Par débordement, il fournit le débit de la source des Cent Fonts.

• Description mathématique



Si $H_d > H_{seuil}$ et $Q_{CF} + Q_{sol} + Q_h - Q_{pomp} > 0$,

$$Q_{source} = 82.103 + 268.174(H_d - H_h) - 123.754(H_d - H_h)^2 + 43.093(H_d - H_h)^3 \text{ sinon}$$

$$Q_{source} = 0 \quad (1)$$

Si $H_d > 76 \text{ m}$, $Q_h = 0 \text{ l/s}$; si $22.5 < H_d < 76 \text{ m}$, $Q_h = 30 \text{ l/s}$; si $H_d < 22.5 \text{ m}$, $Q_h = 36 \text{ l/s}$

$$(2)$$

$$\frac{dH_d}{dt} = \frac{Q_{CF} + Q_h + Q_{sol} - Q_{pomp} - Q_{source}}{S_{drain}} \quad (3)$$

avec : H_d : niveau d'eau ou charge hydraulique dans le drain karstique (m)

S_{drain} : surface dénudée du drain (m^2)

Q_{CF} : débit naturel du système des Cent Fonts (m^3/h)

Q_{sol} : débit de sollicitation des blocs (m^3/h)

Q_h : débit d'infiltration de la rivière Hérault (m^3/h)

Q_{pomp} : débit de pompage (m^3/h)

Q_{source} : débit de la source des Cent Fonts calculé par le modèle (m^3/h)

H_{seuil} : seuil de débordement du drain (m)

Le débit de sollicitation des blocs (Q_{sol}) est calculé dans le réservoir « blocs » décrit ci-dessous.

Le débit naturel des Cent Fonts (Q_{CF}) a été simulé par le modèle Tempo selon différents scénarios de pluies. Il constitue une entrée du modèle.

Le débit de pompage (Q_{pomp}) est constitué de la série de valeurs mesurées pendant l'essai.

Seuls trois paramètres caractérisent ce réservoir (Illustration 28). Ils sont décrits ci-dessous.

La fonction capacitive du drain karstique correspond à son emmagasinement exprimé en m^2 . Il s'agit du volume d'eau libéré par le réseau karstique lorsqu'on diminue le niveau d'eau dans le drain d'un mètre, exprimé en m^3/m , soit en m^2 . Le drain karstique étant constitué de vides de porosité égale à 100%, son emmagasinement correspond donc à la surface totale des vides : c'est la surface dénoyée du drain S_{drain} .

Le seuil de débordement (H_{seuil}) au-delà duquel le réservoir « drain karstique » déborde correspond à l'altitude de la source des Cent Fonts, ce paramètre, mesuré sur le site, est fixé à 76,9 m NGF.

La hauteur d'eau initiale dans le drain (H_{d0}) a été fixée à l'altitude de la source puisque la source débordait au début du pompage.

Paramètre et unité	Signification	Fixé / ajusté
S_{drain} (m^2)	Surface dénoyée du drain karstique	Ajusté
H_{seuil} (m)	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	Fixé (altitude de la source : 76,9 m NGF)
H_{d0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans le drain	Fixé (altitude de la source : 76,9 m NGF)

Illustration 28 - paramètres du réservoir « drain karstique »

Sur base des trois paramètres décrits ci-dessus et des débits imposés du système des Cent Fonts, de pompage et de contribution de l'Hérault, ainsi que des débits d'échange entre les blocs et le drain calculés dans l'autre réservoir, le réservoir « drain karstique » calcule le niveau d'eau dans le drain (H_d) au moyen de la relation (3) et le débit de la source (Q_{source}) au moyen de la relation (1).

Les niveaux d'eau calculés dans le drain karstique seront alors comparés à ceux mesurés dans le forage de pompage CF (F3) et dans le forage de reconnaissance (F2).

b) Hydraulique du réservoir « blocs »

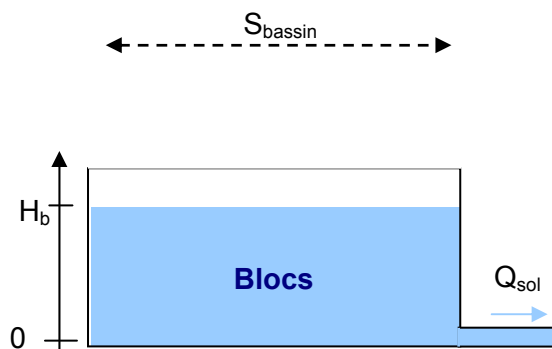
• Fonctionnalités

Ce réservoir correspond aux blocs poreux (et/ou fissurés) et/ou aux systèmes annexes au drainage (SAD) situés entre les drains du réseau karstique. Ceux-ci alimentent le drain karstique selon une relation dépendant de la différence de charge hydraulique qui règne entre blocs et drains.

Le rôle de ce réservoir est de calculer la sollicitation des blocs par le drain en période de pompage, suite au rabattement induit dans le drain karstique ou, à l'inverse, la contribution du drain aux blocs (en période de remontée par exemple).

Ce réservoir a été très peu modifié par rapport à la version initiale.

• Description mathématique



$$\frac{dH_b}{dt} = \frac{-Q_{sol}}{\phi S_{bassin}} \quad (4)$$

avec : H_b : niveau d'eau dans les blocs (m)

S_{bassin} : surface du bassin d'alimentation (m²)

Q_{sol} : débit de sollicitation des blocs par le drain (m³/h)

ϕ : porosité efficace moyenne des blocs (sans dimension)

Q_{sol} est calculé au moyen de la relation analytique de la tranchée drainante implémentée en superposition comme dans le modèle initial.

Outre les paramètres dépendant de la solution analytique employée pour le calcul du débit Q_b , ce réservoir est caractérisé par trois paramètres (Illustration 29).

La surface du bassin d'alimentation des blocs du système karstique a été déterminée par étude hydrogéologique, bilan hydrogéologique et essais de traçage ; elle est évaluée à 30 km².

La porosité efficace des blocs est un paramètre d'ajustement.

La hauteur d'eau initiale dans les blocs a été fixée à une valeur moyenne de 110 m NGF, conformément aux mesures disponibles dans le piézomètre P6. L'hypothèse est faite que le contexte hydrogéologique de ce piézomètre pourrait être représentatif d'un bloc. L'évolution du niveau d'eau de cet ouvrage, notamment lors de la remontée de son niveau suite à la crue de septembre 2005, avec un décalage de plus de 18 jours, indiquerait que le piézomètre serait au sein d'un milieu capacitif raccordé à un système annexe au drainage (Ladouche et al., 2005, rapport BRGM RP-54426-FR).

Paramètre et unité	Signification	Fixé / ajusté
S_{bassin} (m ²)	Surface du bassin d'alimentation du karst (hors BV des pertes de la Buèges)	Fixé : 30 km ²
ϕ (-)	Porosité efficace des blocs	Ajusté
H_{b0} (m)	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	Fixé : 110 m NGF
Autres paramètres	Selon la solution analytique utilisée pour calculer Q_b	Ajustés

Illustration 29 - paramètres du réservoir « blocs »

Sur base des trois paramètres décrits ci-dessus, des paramètres de la solution analytique utilisée et des niveaux d'eau dans le drain karstique et dans les blocs, le réservoir « blocs » calcule le débit de sollicitation des blocs par le drain karstique ou, à l'inverse, le débit de contribution du drain aux blocs (en phase de remontée).

3.3. PRESENTATION DES RESULTATS DES CALAGES DES MODELES UTILISES

3.3.1. Résultats du calage du modèle « niveau piézométrique » de Tempo

a) Caractérisation des réponses impulsionnelles

La technique d'inversion par l'approche de modélisation Tempo consiste à calculer les hydrogrammes unitaires (Illustration 30) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible de l'évolution observée (Illustration 31). Le modèle permet de reproduire très fidèlement les évolutions observées lors des étiages, lors des crues et lors du pompage d'essai de l'été 2005. Le modèle permet d'expliquer 98 % de la variance totale observée, ce qui constitue un très bon résultat (critère de Nash = 0.95).

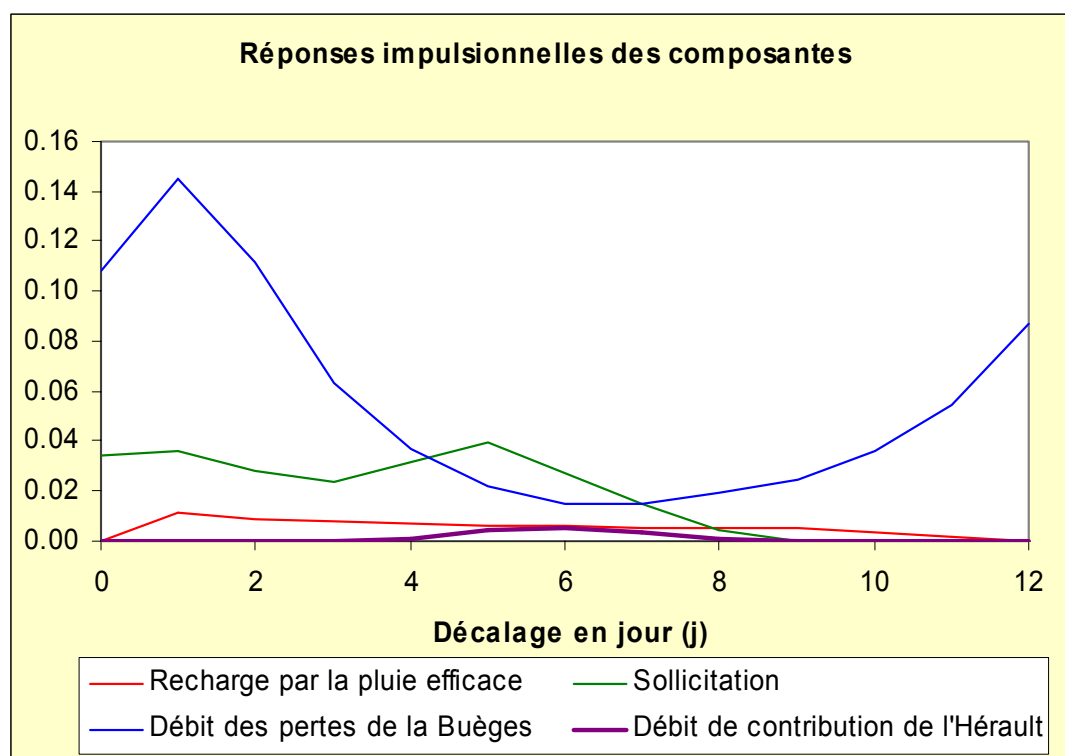


Illustration 30 - Calcul des hydrogrammes unitaires normalisés (réponses impulsionnelles) du modèle piézométrique de Tempo (cf. illustration 6)

Le modèle «niveau piézométrique» étant caractérisé par 4 entrées (pluie efficace, débit des pertes, débit d'infiltration en provenance de l'Hérault et fonction de sollicitation, cf. Illustration 6), 4 réponses impulsionnelles ont donc été déterminées (Illustration 30). Les réponses impulsionnelles de la fonction de sollicitation et du débit de contribution de l'Hérault sont très courtes (12 jours environ). La réponse

impulsionnelle de la fonction de sollicitation intervient immédiatement (décalage = 0 j) et présente un maximum peu prononcé vers 5 jours. La réponse impulsionnelle du débit d'infiltration en provenance de l'Hérault s'exprime lorsque le décalage atteint 4 jours, puis augmente faiblement jusqu'à ce que le décalage atteigne 6 jours. Pour des décalages supérieurs à 8 jours, la réponse devient nulle.

Les réponses impulsionnelles de la recharge par les pluies efficaces et des pertes de la Buèges présentent un maximum pour un décalage de 1 jour puis décroissent plus ou moins rapidement, de manière exponentielle. On retrouve là des évolutions semblables à celle déjà observées en absence de pompage (Ladouche et al, 2004). Pour les pertes de la Buèges, la réponse impulsionnelle n'est pas nulle à l'origine (décalage = 0 jour), ce qui traduit uniquement le fait que le système des Cent Fonts est toujours alimenté par un flux d'eau en provenance des pertes de la Buèges.

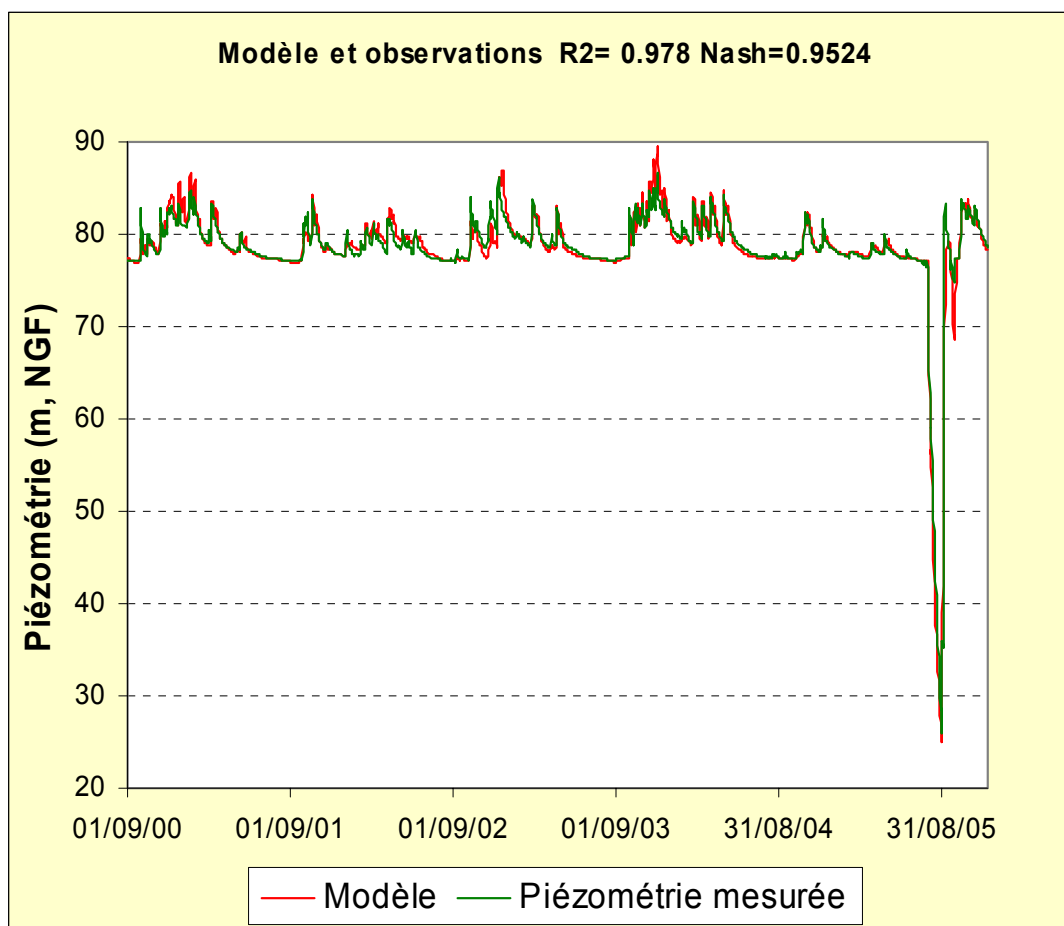


Illustration 31 - Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée aux Cent Fonts (pas de temps journalier, 98 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.95).

b) Contribution relative des composantes du modèle

Nous présentons (Illustration 32) l'évolution temporelle des contributions relatives des différentes composantes du modèle. La composante de la recharge par les pluies efficaces n'intervient que lors des épisodes de crue majeurs et semble engendrer tout au plus une variation d'environ 0.5 m du niveau piézométrique du drain karstique au niveau de l'exutoire des Cent Fonts. Lors de l'épisode de crue du 9 septembre 2005, la composante de la recharge par les pluies efficaces ne provoque qu'une variation relative de 0.2 m environ sur les 5 m observés (lorsque les sources se sont remises à couler (cote 76.9 m, NGF), la charge hydraulique dans le drain karstique a rapidement augmenté pour atteindre un maximum autour de 82 m NGF, la variation relative totale lors de cette crue étant ainsi de l'ordre de 5 m).

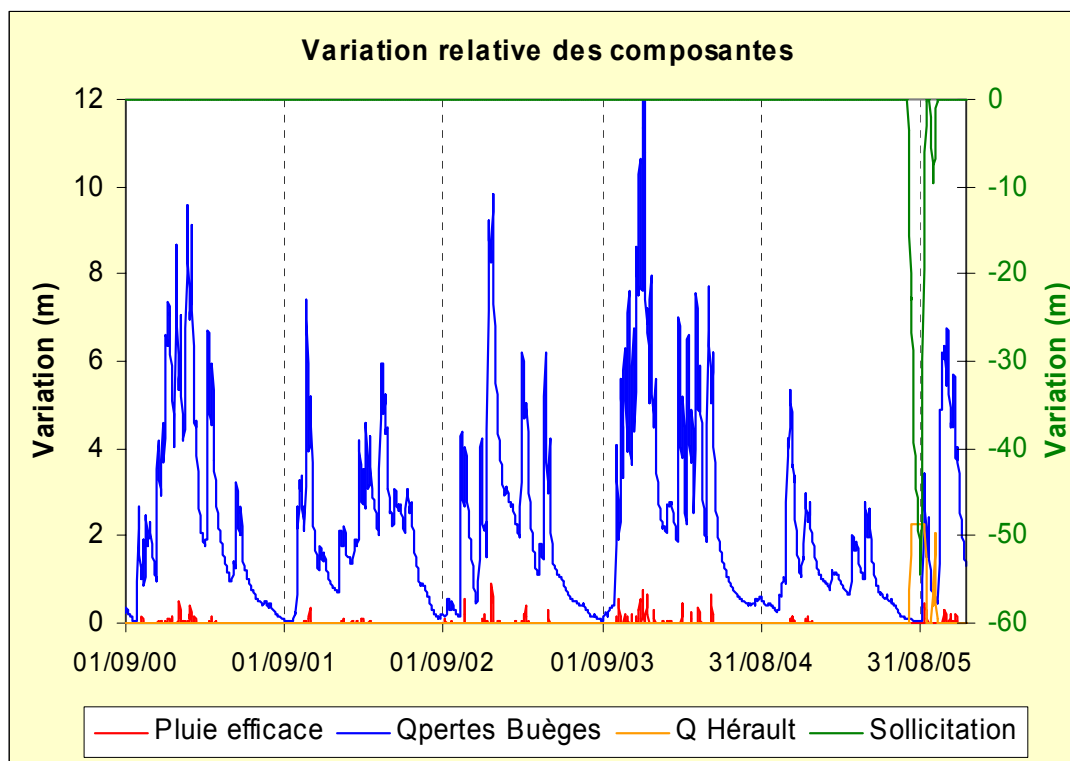


Illustration 32 - Evolution temporelle des contributions relatives du modèle piézométrique de Tempo (cf. illustration 6)

En dehors de la période de pompage du mois d'août 2005 et des périodes hivernales de recharge par les pluies efficaces, la composante associée aux débits des pertes de la Buèges apparaît donc assurer l'essentiel des variations du niveau piézométrique mesuré aux Cent Fonts. Les petites crues observées au printemps 2005 aux Cent Fonts (débit de crue de 1.5 m³/s fin avril, débit de crue de 0.8 m³/s mi juin, cf BRGM/RP 54426-FR, Ladouche et al., 2005) apparaissent donc uniquement engendrées par les pertes de la Buèges.

Lors du pompage, la composante associée à la fonction de sollicitation engendre une diminution qui a atteint environ 50 m en fin de pompage (fin du pompage d'essai longue durée à 400 l/s). Le poids moyen associé à la fonction de sollicitation dans le modèle de transfert est de 24%. Cette valeur est comparable à la valeur du pourcentage de contribution (26.3%) déduite à l'aide du modèle analytique construit sous Matlab Simulink (cf. paragraphe 3.3.2 ci-après).

Lors du pompage, la composante associée au débit d'infiltration en provenance de l'Hérault semble contribuer pour 2 m environ. En d'autre terme, si le système des Cent Fonts n'était pas alimenté par l'Hérault (lorsque les sources tarissent), un rabattement de 2 m supplémentaire aurait pu être observé au niveau du forage F3 lors du pompage d'essai de 2005.

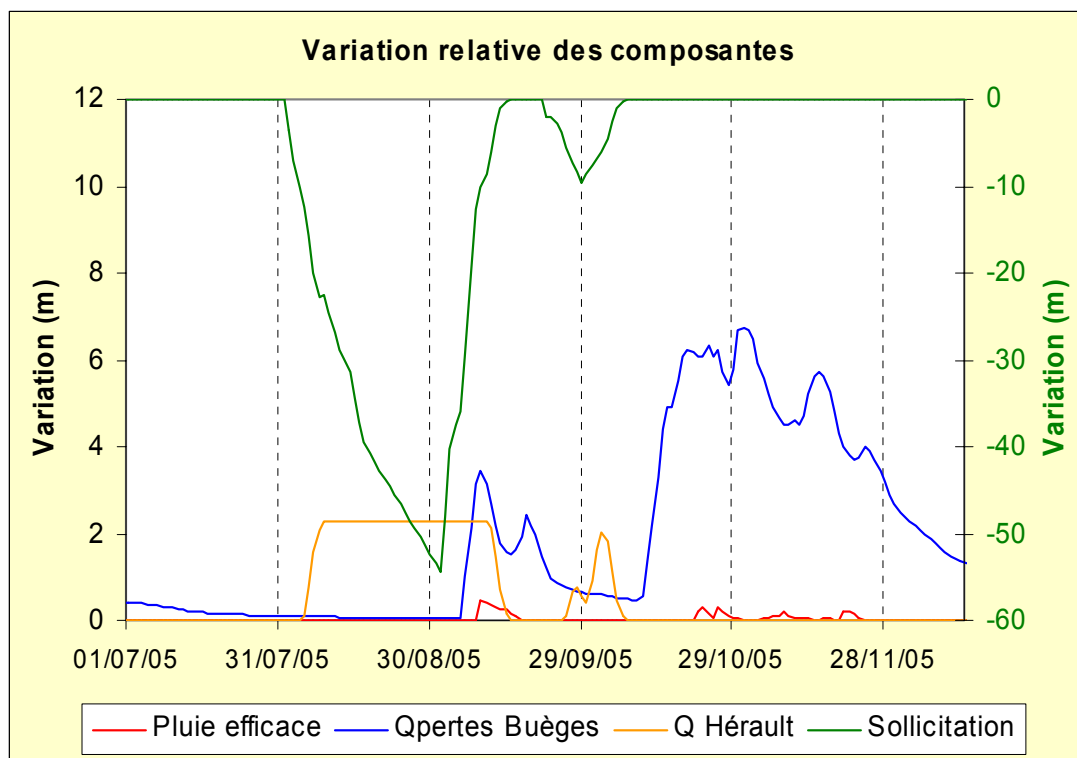


Illustration 33 - Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée aux Cent Fonts (période du 01/07/05 au 31/10/05, pas de temps journalier, 98 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.95).

c) Critique des résultats du modèle et interprétation

Nous présentons (Illustration 33) un agrandissement de l'évolution relative des composantes sur la période de juillet à novembre 2005. On peut constater que la contribution relative des eaux en provenance de l'Hérault calculée par le modèle n'intervient que vers le 5 août, (ceci est lié au décalage observé sur la réponse impulsionnelle). Cette évolution n'est pas conforme à ce qui a été observé lors de

l'essai de pompage. En effet, les suivis de la conductivité des eaux ont permis de montrer que l'Hérault contribue dès la première journée du pompage, dès lors que les sources tarissent. On remarque également une autre anomalie en fin de pompage. La contribution de l'Hérault calculée par le modèle intervient encore lors des épisodes de crue des 7 et 9 septembre 2005. Ceci est impossible car on a montré (cf. rapport BRGM/RP 54426-FR) que la charge piézométrique dans le karst est bien supérieure au niveau de l'Hérault lors des crues des 7 et 9 septembre 2005 ; dans ces conditions aucune infiltration d'eau en provenance de l'Hérault n'est possible dans le karst. Les informations physico-chimiques, et notamment la conductivité des eaux, indiquent par ailleurs que l'eau qui s'écoule lors de cette période provient du karst (Conductivité $>470 \mu\text{S/cm}$, conductivité du fleuve Hérault $=350 \mu\text{S/cm}$).

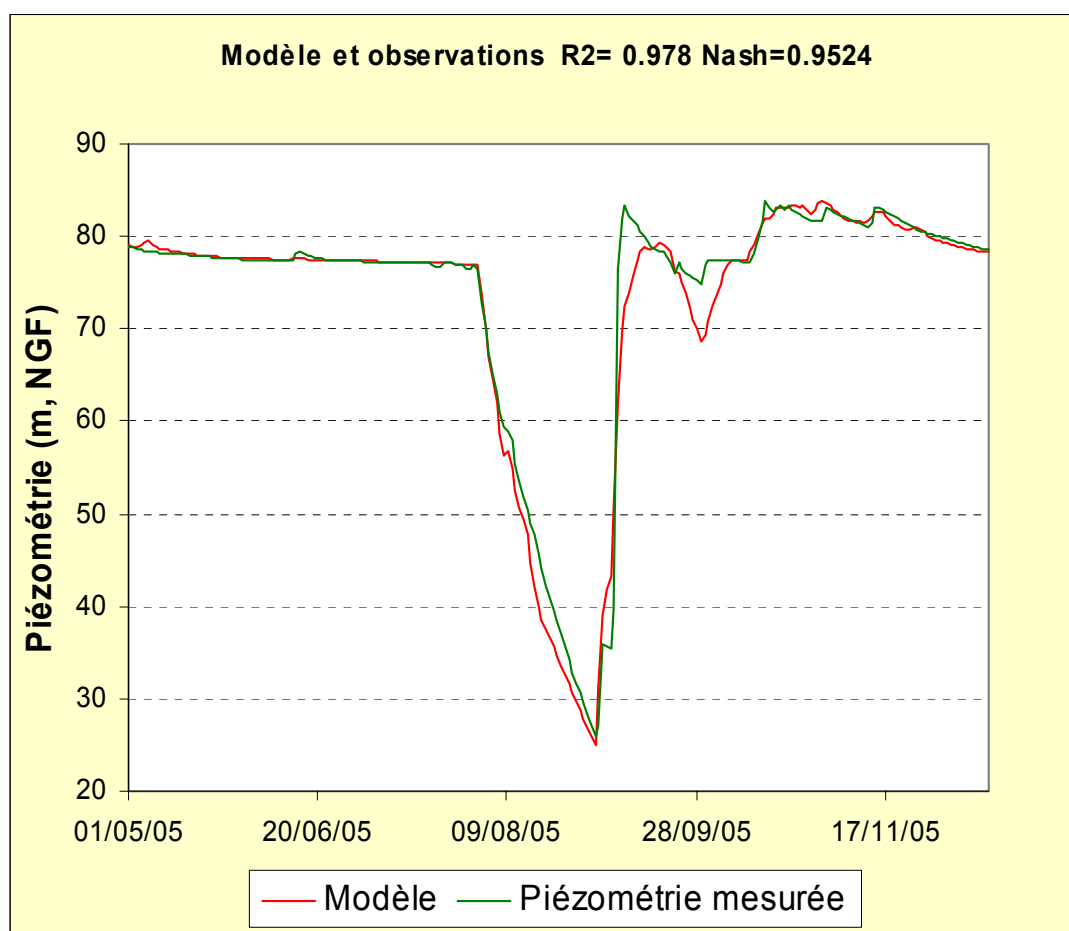


Illustration 34 - Comparaison de la piézométrie modélisée à la piézométrie mesurée aux Cent Fonts (pas de temps journalier, 98 % de la variance totale expliquée, critère de Nash = 0.95).

On constate aussi que le modèle ne permet pas de reproduire complètement l'évolution du niveau d'eau lors des crues du mois de septembre 2005 (Illustration 34). Le niveau piézométrique simulé demeure inférieur au niveau piézométrique observé.

Par ailleurs, lors des essais de pompage par paliers de débit de fin septembre, le modèle surestime les rabattements, le niveau piézométrique simulé étant plus bas que la piézométrie observée. Ces résultats suggèrent qu'une modification, temporaire ou non, du fonctionnement hydrologique du système karstique des Cent Fonts s'est produite lors de l'épisode de crue de septembre 2005. Cette hypothèse semble être corroborée par les résultats du suivi de la turbidité des eaux du karst. En effet, lors des crues de septembre, un épisode important de turbidité a été mesuré (jusqu'à 1500 NTU, cf rapport BRGM/RP 54426-FR), puis les eaux sont restées très turbides (>40 NTU) plusieurs jours (Illustration 35). Cet épisode de turbidité est vraisemblablement à attribuer au décolmatage d'un ou de plusieurs conduits karstiques remplis d'argiles. Le phénomène de turbidité très importante des eaux des Cent Fonts n'avait jamais été mesuré précédemment avant le pompage [depuis octobre 2003, date de début du suivi de la turbidité sur le site]. Au cours de cette période (octobre 2003-juillet 2005), la turbidité des eaux en périodes de crue n'a jamais dépassé la valeur de 38 NTU (Illustration 36).

La piézométrie modélisée par le modèle en septembre 2005 apparaît inférieure à la piézométrie mesurée. Ce résultat semble donc indiquer, pour un débit donné, que les pertes de charges (rabattement) sont plus faibles après la crue qu'avant la crue. De la même façon, pour une perte de charge donnée (rabattement), le débit sollicité après la crue est supérieur au débit sollicité avant la crue. Les propriétés hydrodynamiques du système au voisinage du forage semblent donc avoir changé suite aux crues de septembre 2005. Ce phénomène n'a pas pu être pris en compte de manière explicite par le modèle car il n'avait jamais été mesuré auparavant. La non prise en compte de ce phénomène par le modèle de transfert pourrait expliquer le fait que les rabattements simulés pour les essais de pompage de fin septembre soient plus importants que ceux qui ont été observés car le modèle ne peut intégrer la modification des propriétés hydrodynamiques du milieu au voisinage du forage.

Nous signalons que, depuis septembre 2005, lors des crues la turbidité a dépassé à plusieurs reprises la valeur de 40 NTU (la valeur de la turbidité réellement atteinte lors de ces crues n'est pas connue car la valeur de 40 NTU constitue la valeur de saturation du capteur de mesure). Il conviendrait, à l'avenir, d'étudier de manière détaillée le fonctionnement du système depuis septembre 2005 et de comparer les résultats avec ceux obtenus antérieurement (juin 1997 – juillet 2005) afin d'infirmer ou non les hypothèses émises ci-dessus.

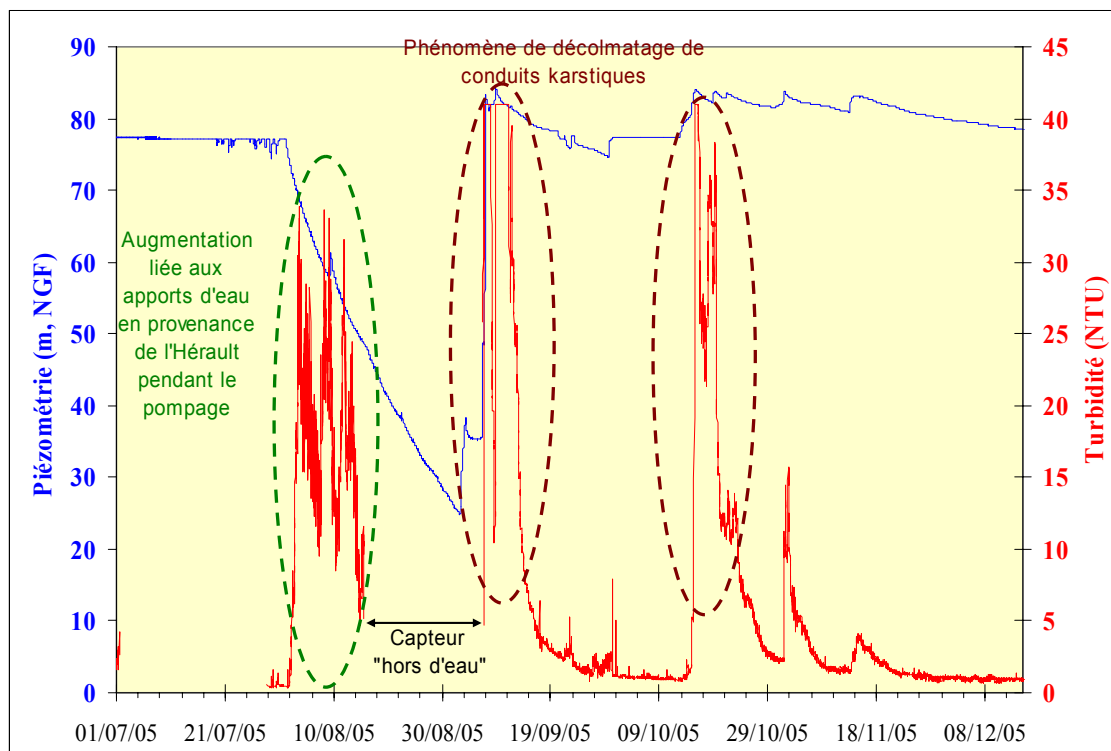


Illustration 35 - Evolution de la turbidité des eaux au forage CGE (09635X0003) sur la période du 01/07/05 au 15/12/05 (pas de temps de 20 mn)

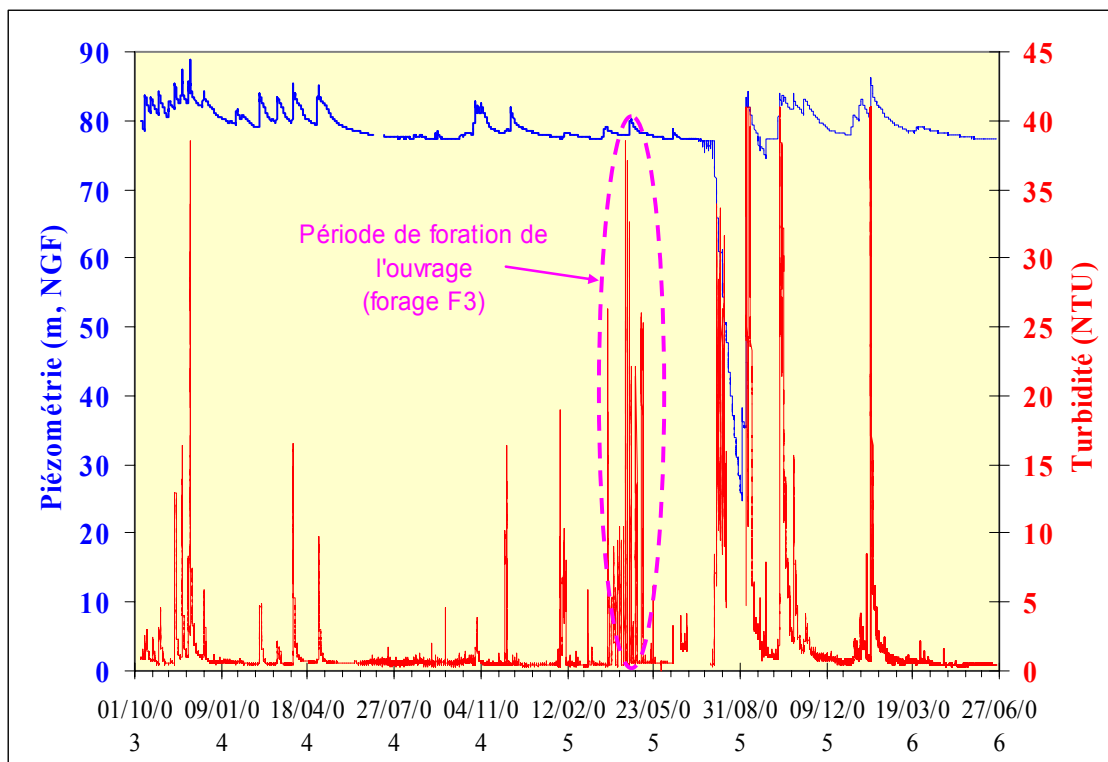


Illustration 36 - Evolution de la turbidité des eaux au forage CGE (09635X0003) depuis le début des suivis (octobre 2003, pas de temps de 20 mn)

Pour conclure cette partie, les résultats obtenus par l'approche de modélisation Tempo sont considérés comme très satisfaisants. Le modèle a donc été utilisé dans la suite de l'étude en simulation pour tester différents scénarios de pompage.

3.3.2. Résultats du calage du modèle de réservoir couplé à une solution analytique

a) Paramètres du modèle

Les paramètres ajustés avec le nouveau modèle décrit dans le paragraphe 3.2 sont les suivants (Illustration 37).

Réservoir	Paramètre	Signification	Valeurs
Drain	$S_{drain} (m^2)$	Surface dénoyée du drain karstique	1600
	$H_{seuil} (m)$	Hauteur d'eau dans le drain au-delà de laquelle la source déborde	76,9
	$H_{d0} (m)$	Hauteur d'eau initiale dans le drain	76,9
Blocs	$S_{bassin} (km^2)$	Surface du bassin d'alimentation du karst	30
	$\phi (-)$	Porosité efficace des blocs	0,007
	$H_{b0} (m)$	Hauteur d'eau initiale dans les blocs	110
	$T_b (m^2/s)$	Transmissivité des blocs	$3,3 \times 10^{-5}$
	$S_b (-)$	Emmagasinement des blocs	0,007
	$l_{drain} (km)$	Longueur du réseau de drains karstiques	10

Illustration 37 - paramètres du nouveau modèle (en gris, paramètres d'ajustement)

La surface dénoyée du drain karstique $S_{drain} = 1600 \text{ m}^2$ est proche de celle déterminée avec le premier modèle. Cette valeur permet en particulier d'ajuster de façon satisfaisante la remontée brusque de niveau d'eau induite par l'arrêt du pompage du 9 août.

La transmissivité obtenue pour les blocs, $T_b = 3,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, est le double de celle obtenue avec le premier modèle.

L'emmagasinement $S_b = 0,007$ utilisé pour le calcul du débit de sollicitation des blocs est cohérent avec la porosité efficace utilisée dans le calcul du rabattement dans les blocs et est identique à celle du premier modèle.

Les paramètres de l'ajustement sont représentés sur le modèle à l'illustration 38.

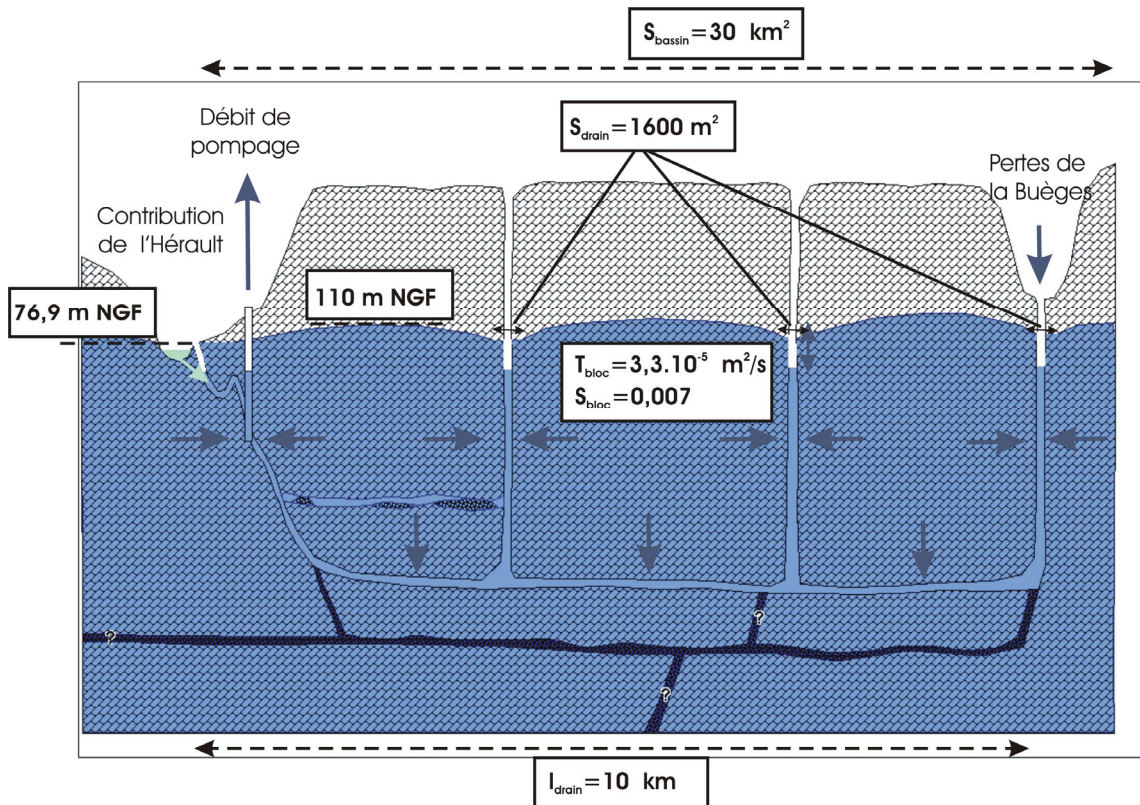


Illustration 38 - schéma du karst et des paramètres utilisés pour le calage du modèle

b) Résultats

Les niveaux d'eau observés et simulés au forage F3 de pompage et au piézomètre F6 sont comparés à l'illustration 39.

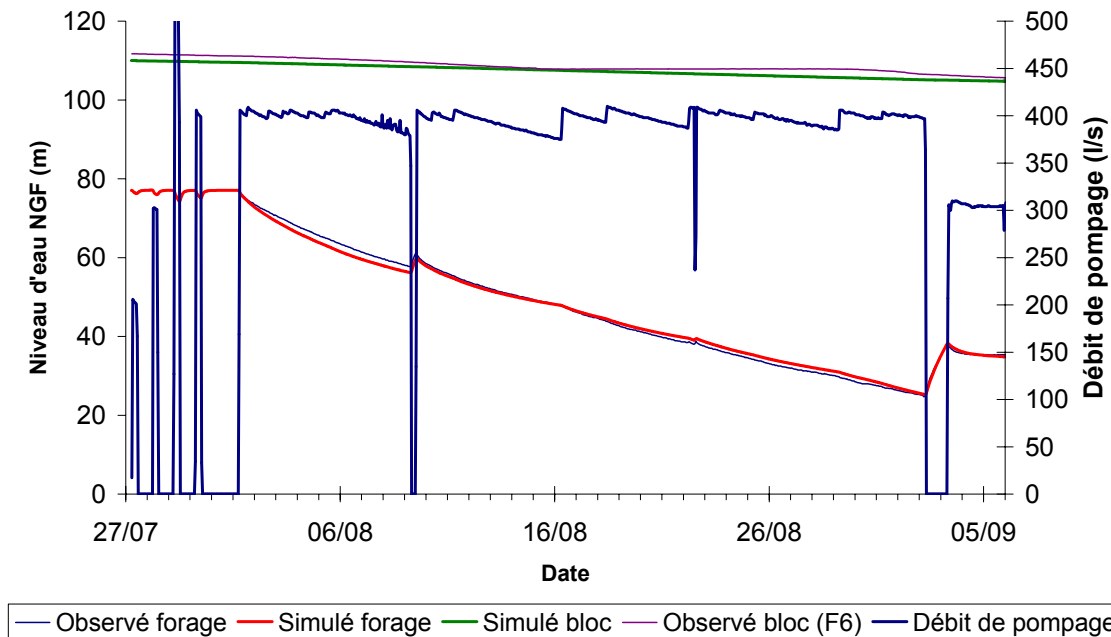


Illustration 39 - comparaison des niveaux d'eau simulés et observés au forage F3 et dans le piézomètre F6 (modèle 3, pas de temps horaire)

Comme avec le premier modèle, les niveaux d'eau simulés au forage CF au moyen de ce modèle sont très proches des niveaux d'eau observés lors du pompage d'essai. La qualité de l'ajustement est particulièrement remarquable lors de la remontée de début septembre et lors du palier de 300 l/s réalisé à la fin de l'essai.

Cette nouvelle version de ce modèle produit des résultats légèrement moins bons que le modèle initial sur la période de l'essai de pompage. Ceci est dû principalement aux paramètres utilisés pour la simulation de la contribution naturelle du système karstique (contribution naturelle des blocs et pertes de la Buèges) en l'absence de pompage. Ces paramètres résultent d'un compromis permettant une utilisation du modèle non seulement durant l'étiage 2005 (au cours de l'essai de pompage) mais sur une année hydrologique complète (périodes de crue et d'étiage).

Les débits observés et simulés à la source des Cent Fonts sont comparés à l'illustration 40 durant les paliers et le début du pompage de longue durée. Le modèle reproduit bien les phases de tarissement de la source ainsi que leur dynamique. De même pour les phases de remontée. On constate cependant une différence entre débits simulés et observés en l'absence de pompage. Cette différence, probablement due à la relation de tarage de la source, reste cependant inférieure à 10% et est jugée acceptable.

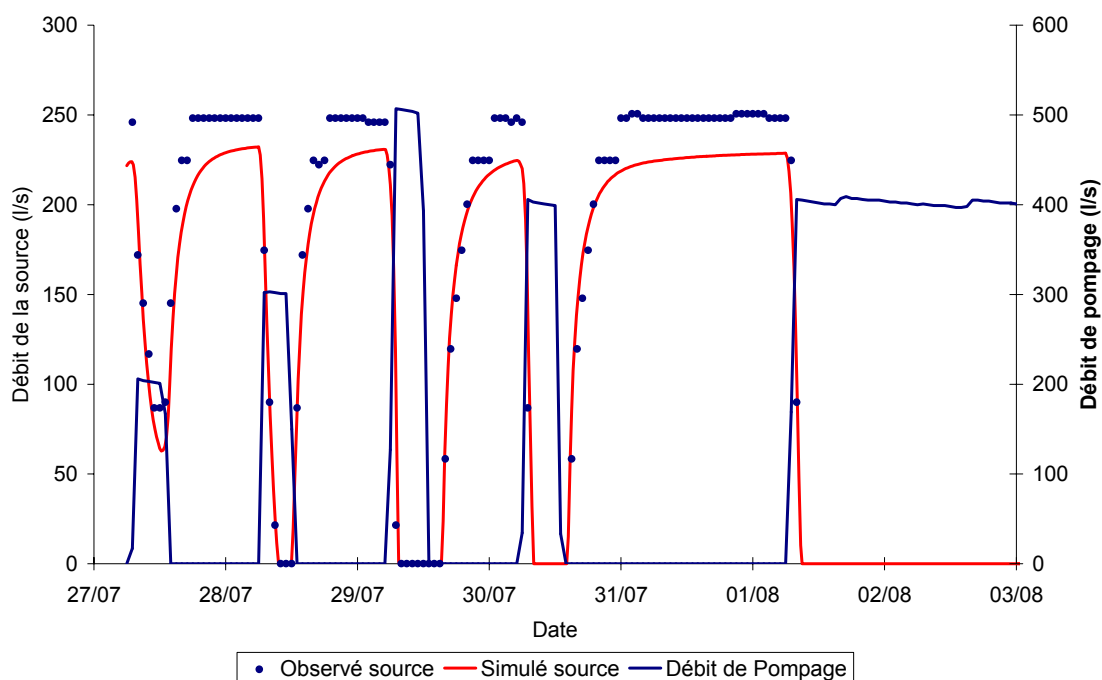


Illustration 40 - comparaison des débits observés et simulés à la source entre le 27 juillet et le 3 août 2005

Avec les caractéristiques hydrodynamiques des blocs obtenues dans le modèle et sous réserve des équivalences possibles, il est possible de calculer (Illustration 41) le rayon d'action et la distance maximale en deçà de laquelle une limite hydraulique devrait être située au sein des blocs pour être visible au cours d'un pompage de durée t .

t (jours)	t (secondes)	R (m)	d (m)
30	2592000	196	98
60	5184000	277	138
90	7776000	339	169
120	10368000	391	196

Illustration 41 - Calcul, au sein des blocs, du rayon d'action et de la distance maximale (drain - limite hydraulique) d'une limite hydraulique visible au cours d'un pompage de durée t (valeurs données à titre indicatif étant donné les équivalences possibles sur les caractéristiques hydrodynamiques des blocs)

Ceci indique que le pompage d'essai de juillet-août 2005, d'une durée approximative d'un mois, a atteint un rayon d'action dans les blocs, autour du drain, d'environ 200 mètres. Le pompage d'essai n'a donc mis en évidence aucune limite hydraulique dans un rayon d'environ 100 mètres autour du drain.

Le modèle permet de calculer la contribution de chacun des flux au débit pompé dans le drain karstique en cours d'essai (Illustration 42). Le débit pompé résulte de la contribution naturelle du système des Cent Fonts, de la sollicitation des blocs, de la contribution de l'Hérault et du déstockage dans le drain karstique.

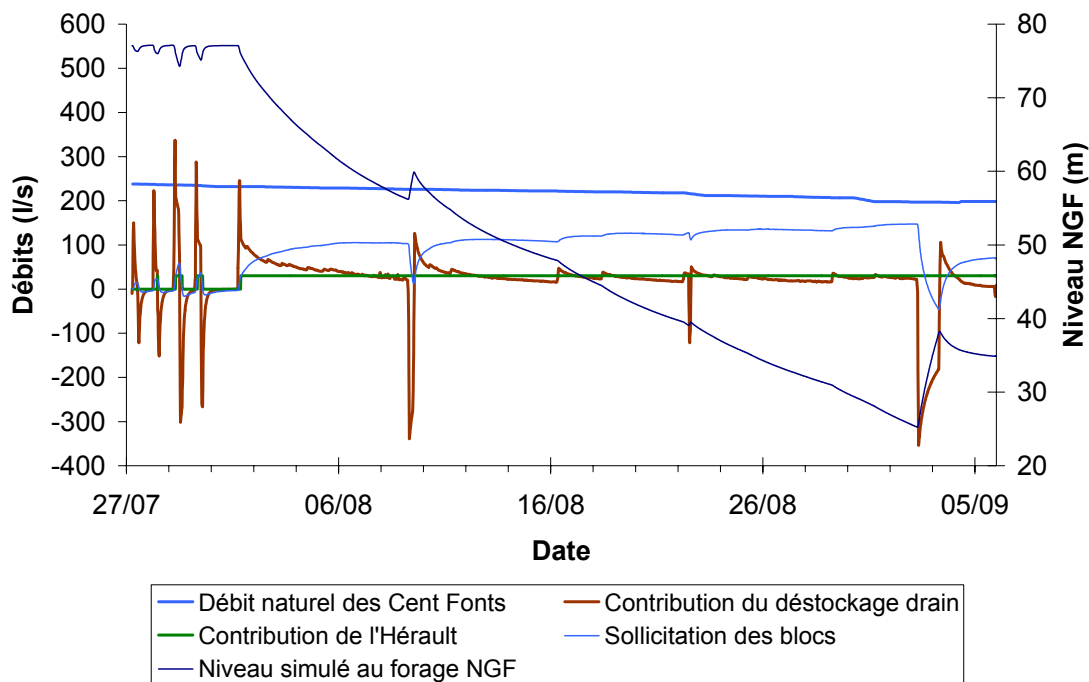


Illustration 42 - évolution des différents flux simulés en cours de pompage

La contribution de l'Hérault devient 30 l/s dès le 1^{er} août lorsque le niveau d'eau dans le drain karstique devient inférieur à 76 m NGF.

Conformément aux valeurs introduites, le débit naturel du système des Cent Fonts décroît de façon régulière de 236 l/s à environ 198 l/s en fin d'essai.

La sollicitation des blocs par le pompage croît avec le temps en raison de l'augmentation des rabattements : elle augmente aussi de 0 (avant le début du pompage) à environ 147 l/s à la fin du palier à 400 l/s. Elle diminue relativement rapidement après chaque arrêt du pompage suite à l'augmentation de niveau d'eau dans le drain et peut même devenir négative lorsque le niveau d'eau dans le drain augmente rapidement et induit une inversion du gradient hydraulique entre blocs et drain. Dans ce cas, le drain alimente les blocs (débit négatif de sollicitation des blocs).

Le déstockage dans le drain diminue au cours du temps avec la diminution de l'augmentation de rabattement. En effet, le débit de déstockage est proportionnel à la vitesse de rabattement dans le drain. Il oscille entre 245 l/s en début de pompage et environ 23 l/s en fin de palier. Il augmente de façon importante après chaque augmentation du débit de pompage. Il devient négatif lors des arrêts de pompage lorsque le niveau d'eau dans le drain augmente rapidement et que l'eau est restockée (débit de déstockage négatif) dans le drain.

L'origine des volumes d'eau transitant dans le karst durant l'ensemble du pompage de basses eaux (du 27 juillet au 6 septembre 2005) est décrite à l'illustration 43 et à l'illustration 44.

Flux	Volume (m ³)	Contribution au volume total (%)
Sollicitation supplémentaire des blocs du fait du pompage	333805	26.3%
Débit naturel des Cent Fonts ⁷	774972	61.0%
Infiltration de l'Hérault	94510.8	7.4%
Déstockage drain	67587.4	5.3%
Total	1270875	100.0%

Illustration 43 - Origine des volumes d'eau pompée lors du pompage d'essai de juillet-août 2005 à partir des résultats du modèle

Sur les 1270000 m³ ayant transité par le système karstique durant cette période, environ 94 % ont été pompés et les 6% restant sont sortis par la source lorsqu'elle n'était pas tarie (Illustration 44b).

Le pompage au niveau d'un forage situé à l'amont d'une source karstique permet d'extraire de l'eau du système aquifère qui en conditions d'étiage ne s'écoulent pas dans ces proportions au niveau de la source. Plus du tiers de l'eau pompée, sans compter l'eau infiltrée dans le système par l'Hérault, résulte d'une sollicitation du système par pompage. Le système est sollicité au-delà de la valeur de débit à l'étiage de son exutoire. Les réserves sont sollicitées, et seront reconstituées lors des périodes de recharge. Ces résultats expliquent le principe de la gestion active de l'eau d'un système karstique.

⁷ Débit naturel des Cent Fonts = alimentation par les pertes de la Buèges et par les blocs se vidangeant naturellement dans les drains.

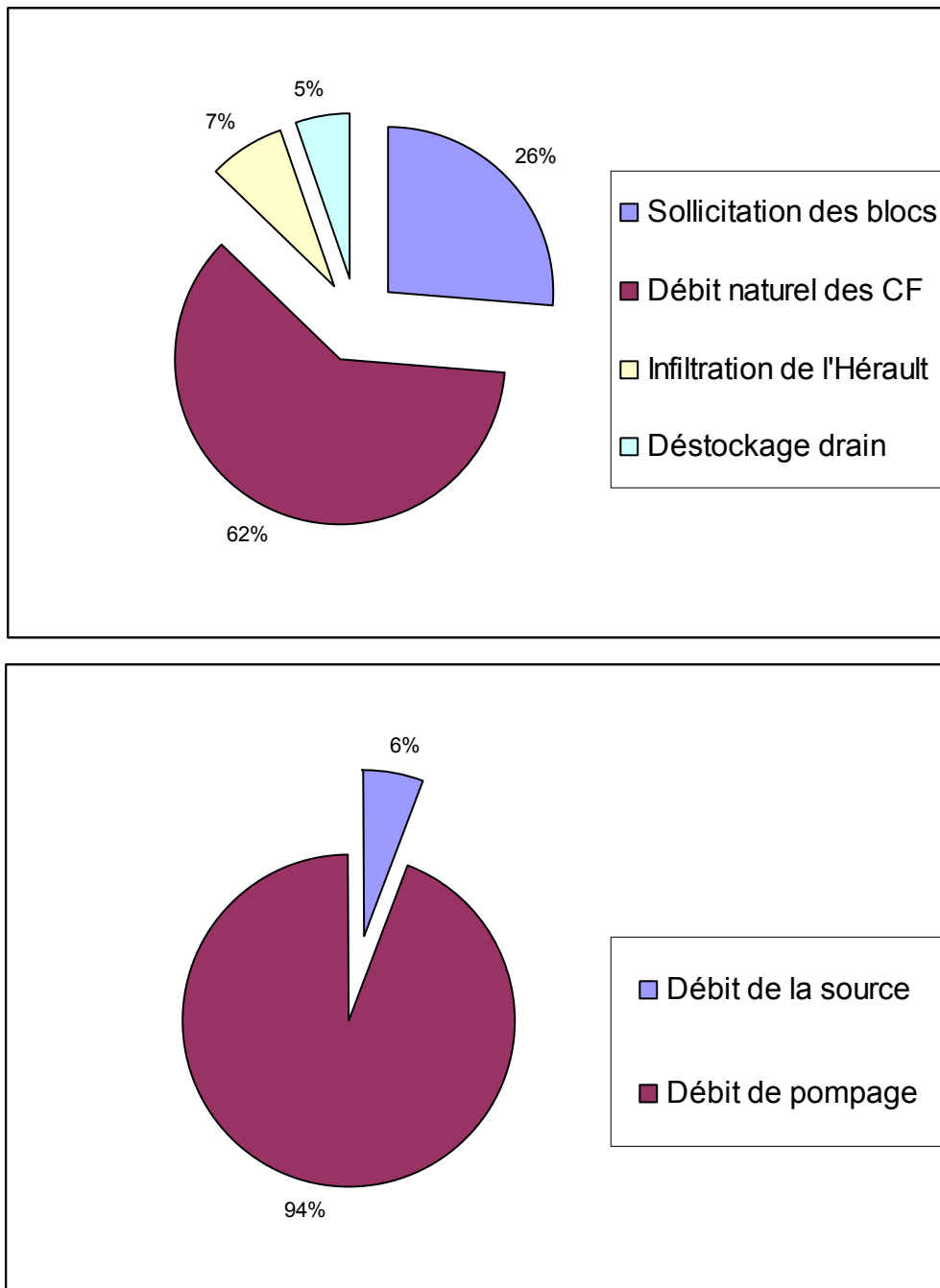


Illustration 44 - répartition des volumes écoulés lors du pompage d'essai de juillet-août 2005

4. Présentation et discussion des résultats de l'intercomparaison des deux approches de simulation

4.1. INTERCOMPARAISON DES RESULTATS DES MODELES EN CONSIDERANT UNE CHRONIQUE DE POMPAGE IDENTIQUE A CELLE DU POMPAGE D'ESSAI DE LONGUE DUREE DE L'ETE 2005

4.1.1. Objectif

Dans le cadre de cette étude, deux modèles distincts ont été développés ; ils reposent sur des approches de modélisation radicalement différentes. Les deux modèles permettent de reproduire de manière très satisfaisante les évolutions observées lors des essais de pompage de l'été 2005.

Nous avons cherché à évaluer le comportement des deux modèles pour différents contextes hydrologiques, lorsque le système est soumis à un pompage. Pour ce faire, nous avons considéré une chronique de pompage identique à celle du pompage de longue durée de 2005 et des chroniques d'entrées identiques pour les deux modèles.

4.1.2. Données d'entrée utilisées

L'inter-comparaison des modèles porte sur les chroniques du run 1 générées par le modèle prévisionnel. Au total, 6 contextes hydrologiques différents ont été étudiés et inter-comparés.

Les contextes hydrologiques des différents cycles hydrologiques étudiés sont les suivants :

Cycle 2005-2006 : probabilité d'occurrence : 30 ans sec.

Cycle 2006-2007 : probabilité d'occurrence : 10 ans sec.

Cycle 2007-2008 : probabilité d'occurrence : 20 ans sec.

Cycle 2008-2009 : probabilité d'occurrence : 10 ans sec.

Cycle 2009-2010 : probabilité d'occurrence : >10 ans humide < 20 ans humide

Cycle 2010-2011 : probabilité d'occurrence : 4 ans humide

4.1.3. Inter-comparaison des résultats

Nous présentons (Illustration 45) l'évolution temporelle des niveaux piézométriques simulés par les deux modèles sur la période 2006-2011.

Les évolutions simulées par les deux modèles sont très comparables. Les rabattements atteints à la fin des pompages à 400 l/s par le modèle Tempo apparaissent globalement plus importants que ceux calculés par le modèle analytique développé sous Matlab/Simulink. La différence est en moyenne de l'ordre de 5 m pour les contextes hydrologiques de type « décennal sec ». Pour les contextes hydrologiques de type « 20 ans sec et 30 ans », la différence entre les deux modèles tend à se réduire en fin de pompage, la piézométrie calculée par le modèle analytique apparaissant même un peu plus faible que celle du modèle Tempo.

La valeur de la piézométrie atteinte à la fin des pompages à 400 l/s dépend du contexte hydrologique qui prévaut lors du pompage. Dans les exemples présentés, on montre que le pompage n'induit pas ou peu de rabattement en contexte hydrologique d'année humide. En contexte hydrologique de type décennal sec, le niveau piézométrique baisse de l'ordre de 20-25 m, de l'ordre de 30-35 m en contexte hydrologique de type 20 ans « sec », de l'ordre 40-45 m en contexte hydrologique de type 30 ans « sec ».

Le modèle Tempo apparaît globalement plus « pessimiste » que le modèle analytique pour les périodes de pompage inférieures à 30 jours. Dans les exemples présentés, les durées des périodes de sollicitation des réserves du karst sont inférieures à 20 jours pour les cycles de types 10 ans sec et de l'ordre de 30 jours pour les cycles de types 20 ans sec et 30 ans sec. Lors du pompage de l'été 2005 qui a été effectué dans un contexte hydrologique de type « 30 ans » sec, la sollicitation des réserves a duré également 1 mois environ (36 jours), soit la durée du pompage d'essai longue durée. Les paramètres des modèles ont donc été déterminés sur la base des résultats obtenus sur une durée de sollicitation d'un mois environ.

Pour des durées de sollicitation des réserves supérieures à 30 jours, les modèles sont donc utilisés en extrapolation. Il est donc supposé que les propriétés et le comportement du système restent inchangés lorsque les modèles sont utilisés en extrapolation.

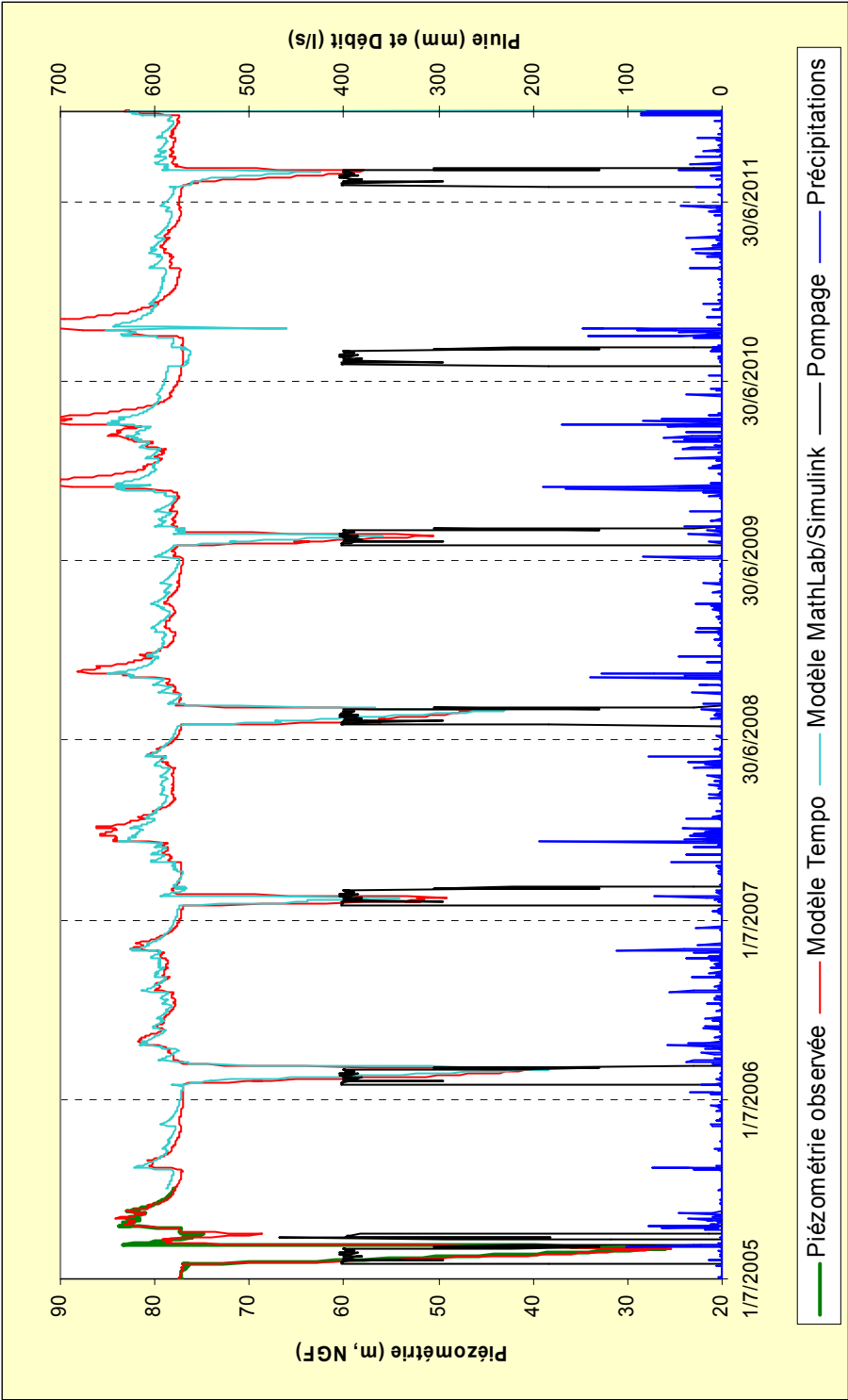


Illustration 45 - Evolution temporelle de la piézométrie simulée par les deux modèles (données d'entrées du Run 1, chronique de pompage identique à 2005 : du 01 aout au 6 septembre)

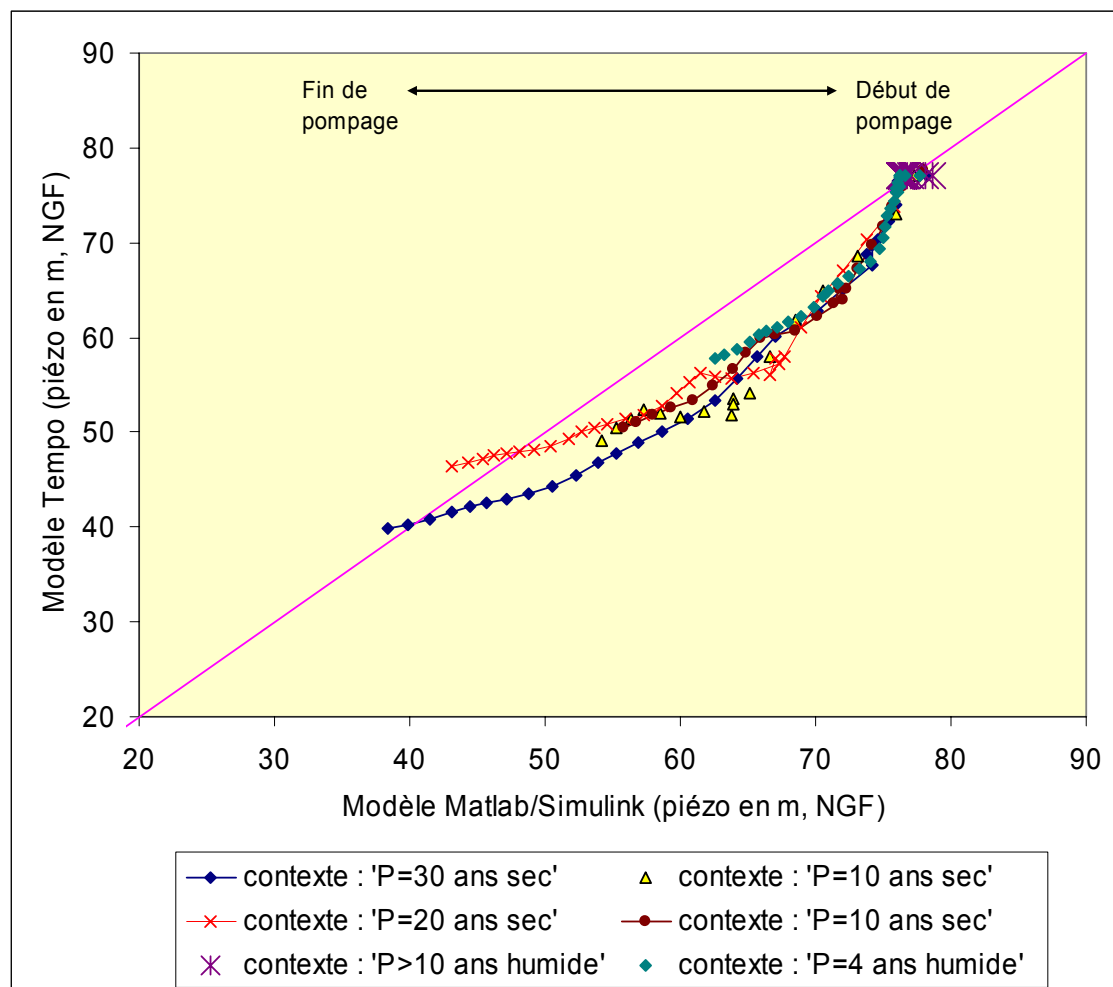


Illustration 46 - intercomparaison des résultats des modèles lors des périodes de pompage (données d'entrées du Run 1, chronique de pompage identique à 2005 : du 01 août au 6 septembre)

5. Simulation de scénarios d'exploitation de l'aquifère des Cent Fonts

5.1. DONNEES D'ENTREE CONSIDEREES

Le modèle prévisionnel décrit dans le chapitre 3 a permis de générer 3 chroniques de pluie différentes de 10 ans chacune (Runs 1, 2 et 3 sur la période 2006-2016). Les sous modèles de transfert de débit ont permis de calculer les débits des pertes de la Buèges et des Cent Fonts sur ces mêmes périodes. Au total, les chroniques établies permettent d'étudier le comportement du système karstique pour 30 situations hydrologiques différentes. Les scénarios de pompage considérés ont été établis sur la base du principe méthodologique présenté dans le chapitre 2. Les scénarios de pompage sont fonction (1) de la valeur du scénario AEP considéré (Q_{AEP} base, cf. Illustration 3), (2) des conditions de débit à réserver au fleuve Hérault (Q_r) et (3) de l'état hydrologique du karst, cette dernière variable pouvant être renseignée par la valeur du débit qu'aurait présenté la source en absence de pompage. Dans cette étude, 4 scénarios de débit AEP ont été considérés (Q_{AEP} base = 100 l/s, 125 l/s, 150 l/s et 200 l/s, cf. Illustration 3) et 3 scénarios de débit à réserver à l'Hérault ont été considérés (Q_r = 200 l/s, 250 l/s et 300 l/s). Les synthèses des paramètres des différents scénarios pour chacune des chroniques d'entrée de pluie considérée (run 1, run 2 et run 3) sont rassemblées dans les tableaux suivants (Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6).

La combinaison des différents scénarios de débit à réserver au fleuve Hérault (Q_r) et de débit AEP conduit à des pompages maximaux compris entre 400 et 700 l/s, notamment lors de la semaine de pointe du mois d'août.

Au total, 350 fonctions de pompage et de sollicitation différentes de un an ont été générées. Les résultats obtenus à l'aide du modèle « piézométrique » de Tempo concernent au total 30 cycles hydrologiques différents. Les résultats permettent d'étudier le comportement du système karstique dans des situations hydrologiques contrastées et notamment pour 9 fréquences d'occurrence distinctes :

- fréquence d'occurrence de type « > 30 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « 30 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « 20 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « 10 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « d'année médiane »,
- fréquence d'occurrence de type « 4 ans, humide »,
- fréquence d'occurrence de type « 5 ans, humide »,
- fréquence d'occurrence de type « 10 ans, humide »,

- fréquence d'occurrence de type « 20 ans, humide ».

Dans la suite de l'étude, nous avons étudié plus particulièrement les résultats pour les fréquences d'occurrences suivantes :

- fréquence d'occurrence de type « d'année médiane »,
- fréquence d'occurrence de type « 10 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « 20 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « 30 ans, sec »,
- fréquence d'occurrence de type « > 30 ans, sec ».

La synthèse des différents résultats obtenus à l'aide de l'approche Tempo est présentée dans le paragraphe suivant (5.2).

Sur la base des résultats Tempo, un certain nombre de scénarios de pompage (fonction de pompage) a été sélectionné pour l'approche de modélisation numérique développée sous Matlab/Simulink. La synthèse des différents résultats obtenus à l'aide de ce modèle est présentée dans le paragraphe suivant (5.3).

Les résultats obtenus par les deux approches de modélisation ont été interprétés en considérant deux configurations possibles de pompage :

- 1) la limite de pompage du forage actuel (F3). La piézométrie en cours de pompage ne peut descendre au dessous de la cote de 27 m NGF⁸ (valeur moyenne journalière de la piézométrie). Ce seuil fixé à 27 m NGF constitue un seuil d'alerte qui indique qu'il reste 8.5 m d'eau au dessus de la pompe qui ne doit en aucun cas être dénoyée,
- 2) la limite de pompage d'un nouvel ouvrage plus profond (ce forage n'existe pas). La configuration du drain karstique (partie reconnue et topographiée) à proximité de l'ouvrage actuel permet d'envisager la réalisation d'un ouvrage plus profond à 30 m de distance environ de l'ouvrage F3. Compte tenu de la configuration du drain karstique, la limite de pompage de cet ouvrage est fixée à -3 m NGF.

⁸ La cote de 27 m NGF constitue une cote très sécuritaire. En effet, le haut de la pompe est situé à la côte de 18.5 m NGF.

Tableau 4 - Paramètres des scénarios du run 1

Entrée du run 1:

Pluie run 1

QCF naturel estimé à l'aide du sous modèle de transfert « Cent Fonts », chronique de Pluie du run 1

Q pertes estimé à l'aide du sous modèle de transfert « pertes » chronique de Pluie du run 1

Entrées 1	Entrée 2	Commentaires
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 200 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		4 combinaisons étudiées, soit 40 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 200 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 250 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		4 combinaisons étudiées, soit 40 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 200 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 300 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		4 combinaisons étudiées, soit 40 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 200 l/s		
		Total de 12 combinaisons différentes, résultats pour 10 cycles différents, soit 120 fonctions de pompage et de sollicitation différentes

Tableau 5 - Paramètres des scénarios du run 2

Entrée du run 2:

Pluie run 2

QCF naturel estimé à l'aide du sous modèle de transfert « Cent Fonts », chronique de Pluie du run 2

Q pertes estimé à l'aide du sous modèle de transfert « pertes » chronique de Pluie du run 2

Entrées 1	Entrée 2	Commentaires
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 200 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		3 combinaisons étudiées soit 30 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 250 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		3 combinaisons étudiées, soit 30 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 300 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		3 combinaisons étudiées, soit 30 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
		Total de 9 combinaisons différentes, résultats pour 10 cycles différents, soit 90 fonctions de pompage et de sollicitation différentes

Tableau 6 - Paramètres des scénarios du run 3

Entrée du run 3:

Pluie run 3

QCF naturel estimé à l'aide du sous modèle de transfert « Cent Fonts », chronique de Pluie du run 3

Q pertes estimé à l'aide du sous modèle de transfert « pertes » chronique de Pluie du run 3

Entrées 1	Entrée 2	Commentaires
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 200 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		4 combinaisons étudiées, soit 40 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 200 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 250 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		4 combinaisons étudiées, soit 40 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 200 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 300 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		3 combinaisons étudiées, soit 30 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
Q _{AEP} base = 100 l/s	Q réservé = 300 l/s	10 cycles hydrologiques étudiés
Q _{AEP} base = 125 l/s		3 combinaisons étudiées, soit 30 simulations
Q _{AEP} base = 150 l/s		
		Total de 14 combinaisons différentes, résultats pour 10 cycles différents, soit 140 fonctions de pompage et de sollicitation différentes

5.2. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS AU MOYEN DU MODELE PIEZOMETRIQUE DE TEMPO

Nous présentons (Illustration 47 et Illustration 48) les évolutions temporelles des fonctions de pompage et de sollicitation des réserves du karst pour deux situations hydrologiques très déficitaires de fréquence d'occurrence de 30 ans (30 ans sec). Dans le cas de l'Illustration 47, les premières crues automnales se produisent au début du mois de septembre, tandis que dans l'Illustration 48, les premières crues automnales se produisent plus tardivement (début octobre). Ces deux exemples permettent d'illustrer deux situations différentes. Dans le premier cas (Illustration 47), la piézométrie minimale est observée lors de la semaine de pointe du mois d'août (débit de pompage = 400 l/s dans cet exemple). Lorsque les crues automnales tardent à venir, la piézométrie minimale atteinte lors du pompage peut être observée bien après la semaine de pointe du mois d'août (cf. Illustration 48).

Dans la suite de l'étude, nous examinerons donc plus particulièrement la situation du système pour deux périodes distinctes à savoir (1) à la fin de la semaine de pointe du mois d'août (vers le 21 août) et (2) juste avant les premières crues d'automne, qui se produisent généralement dans le courant du mois de septembre ou au début du mois d'octobre, mais qui peuvent apparaître, certaines années, bien plus tardivement, en décembre par exemple. Ceci a été observé en 1998 sur le système des Cent Fonts, les premières crues ne se sont produites qu'à la fin décembre.

Dans les deux exemples présentés (Illustration 47 et Illustration 48), le débit résiduel des sources devient nul (les sources tarissent) respectivement autour du 7 juillet et du 15 juillet. A partir de ces dates, le débit de pompage (400 l/s) devient supérieur aux débits naturels qu'aurait présentés le système en absence de pompage. C'est à partir de ces dates que l'on commence à solliciter les réserves du karst.

Dans les exemples présentés aux Illustration 47 et Illustration 48, le débit réservé au fleuve ($Q_r = 200$ l/s dans ces exemples) apparaît dans un premier temps inférieur au débit naturel qui se serait écoulé en absence de pompage, puis supérieur au débit naturel vers la fin du mois d'août et au mois de septembre. L'importance du déficit d'écoulement ou, au contraire, de l'excédent d'écoulement lors de la période des mois d'été varie de manière complexe en fonction (1) de la valeur du débit réservé (Q_r) et (2) du contexte hydroclimatique dans lequel se trouve le système karstique (Illustration 52, Illustration 50 et Illustration 51). Dans les exemples présentés ($Q_r = 200, 250$ et 300 l/s), la différence d'écoulement indique un « déficit » maximum en début d'été pour le contexte hydrologique d'année « médiane », puis tend à se réduire au fur et à mesure. Pour une condition de débit réservé égale à 200 l/s, la différence de débit devient positive dans le courant de l'été pour les contextes hydrologiques de type « trentenal sec » ($Q_r > QCF$ naturel). Pour une condition de débit réservé égale à 250 l/s, le débit réservé (Q_r) devient supérieur au débit naturel (QCF naturel) dans le courant de l'été pour les contextes hydrologiques de type « 30 ans sec » (en juillet), « 20 ans sec » et « 10 ans sec » (en août), et plus tardivement (mi septembre) pour le contexte hydrologique « médian ». Pour une condition de débit réservé égale à 300 l/s, le débit réservé (Q_r) devient supérieur au débit naturel (QCF naturel) fin juin pour le contexte hydrologique de type « 30 ans sec », dans le courant du mois de juillet pour

les contextes hydrologiques de type « 20 ans sec » et « 10 ans sec » et au mois d'août pour le contexte hydrologique « médian ».

Les éléments d'information résumés ci-dessus pourront être utilisés dans le cadre des discussions qui s'engageront dans le futur pour la définition du débit réservé à restituer au fleuve Hérault. Ce débit réservé devra figurer dans la Déclaration d'Utilité Publique (DUP) si le système karstique des Cent Fonts devait être exploité.

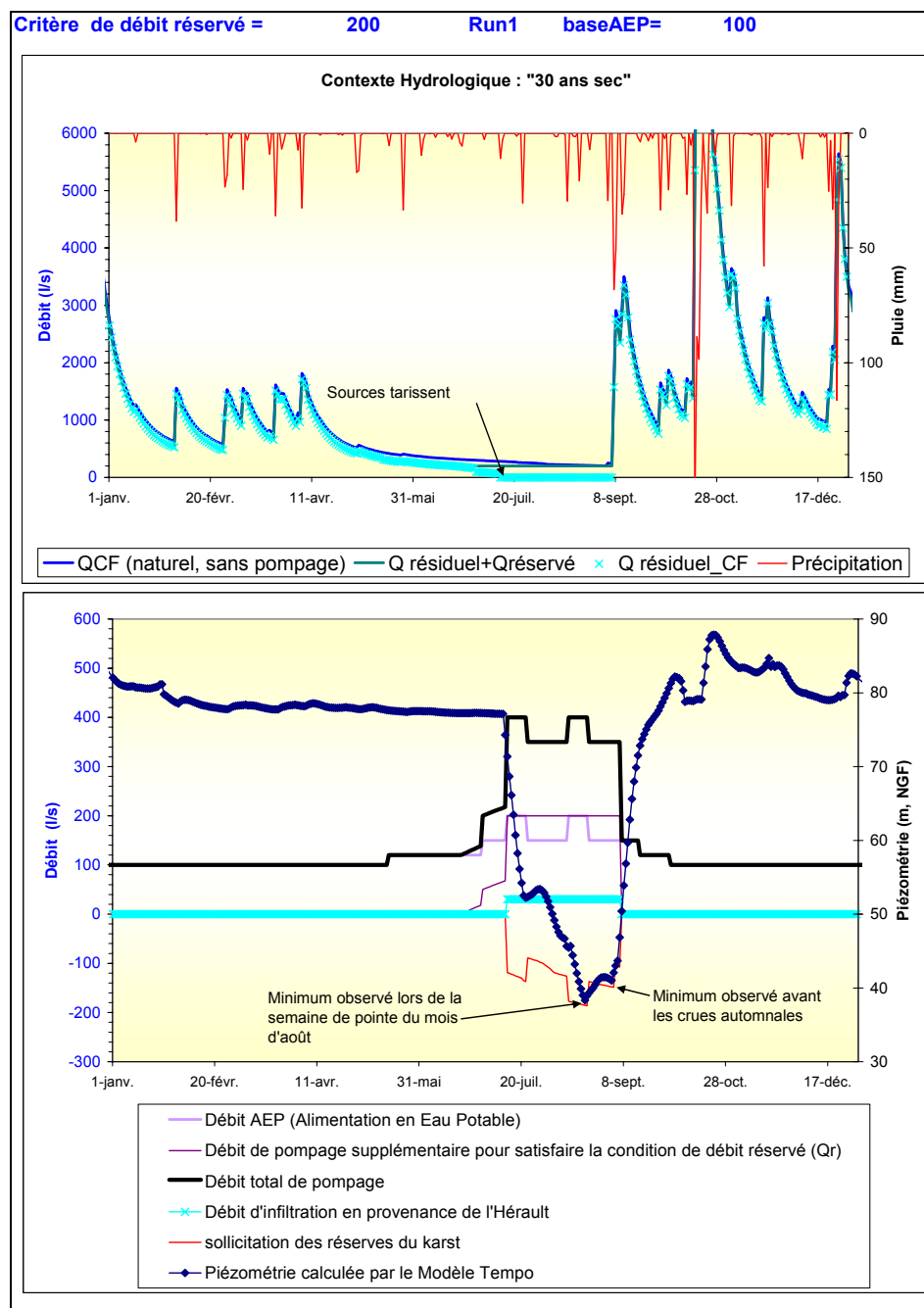


Illustration 47 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par le modèle Piézométrique de Tempo en contexte hydrologique d'année fortement déficitaire : probabilité d'occurrence de type « 30 ans sec » (Scénario : $Q_{réservé} = 200$ l/s, $Q_{base AEP} = 100$ l/s). Les évolutions des composantes (QAEP, $Q_{supplémentaire}$) de la fonction de pompage, de la fonction de sollicitation des réserves du karst, du débit naturel de la source qu'aurait présenté les Cent Fonts (QCF naturel) en absence de pompage sont également reportées ainsi que le débit de contribution en provenance de l'Hérault, le débit résiduel des Cent Fonts et le débit réservé au fleuve Hérault.

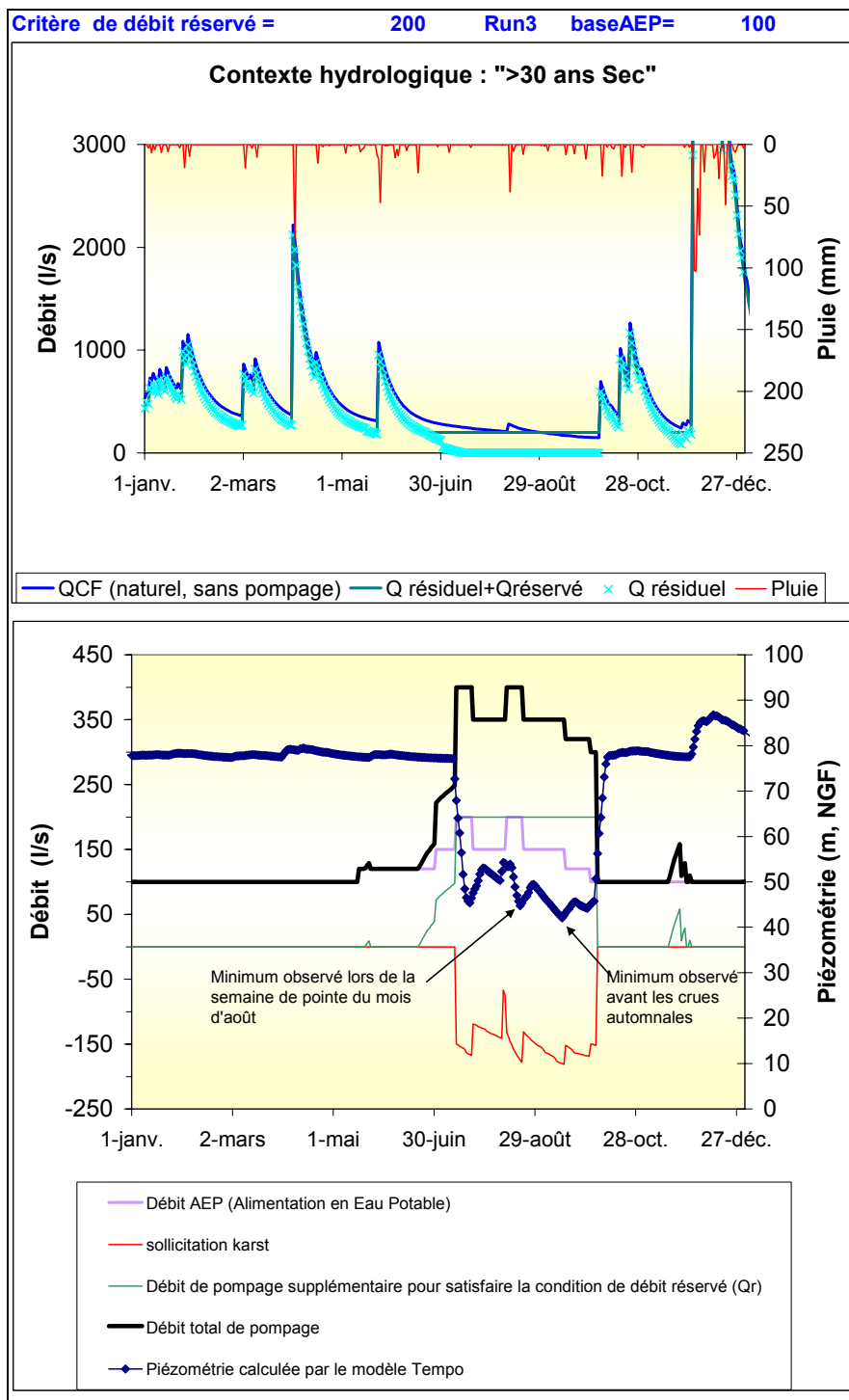


Illustration 48 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par le modèle Piézométrique de Tempo en contexte hydrologique d'année forte et déficitaire : probabilité d'occurrence de type « >30 ans sec » (Scénario : Q_{réserve} = 200 l/s, Q_{base AEP} = 100 l/s).

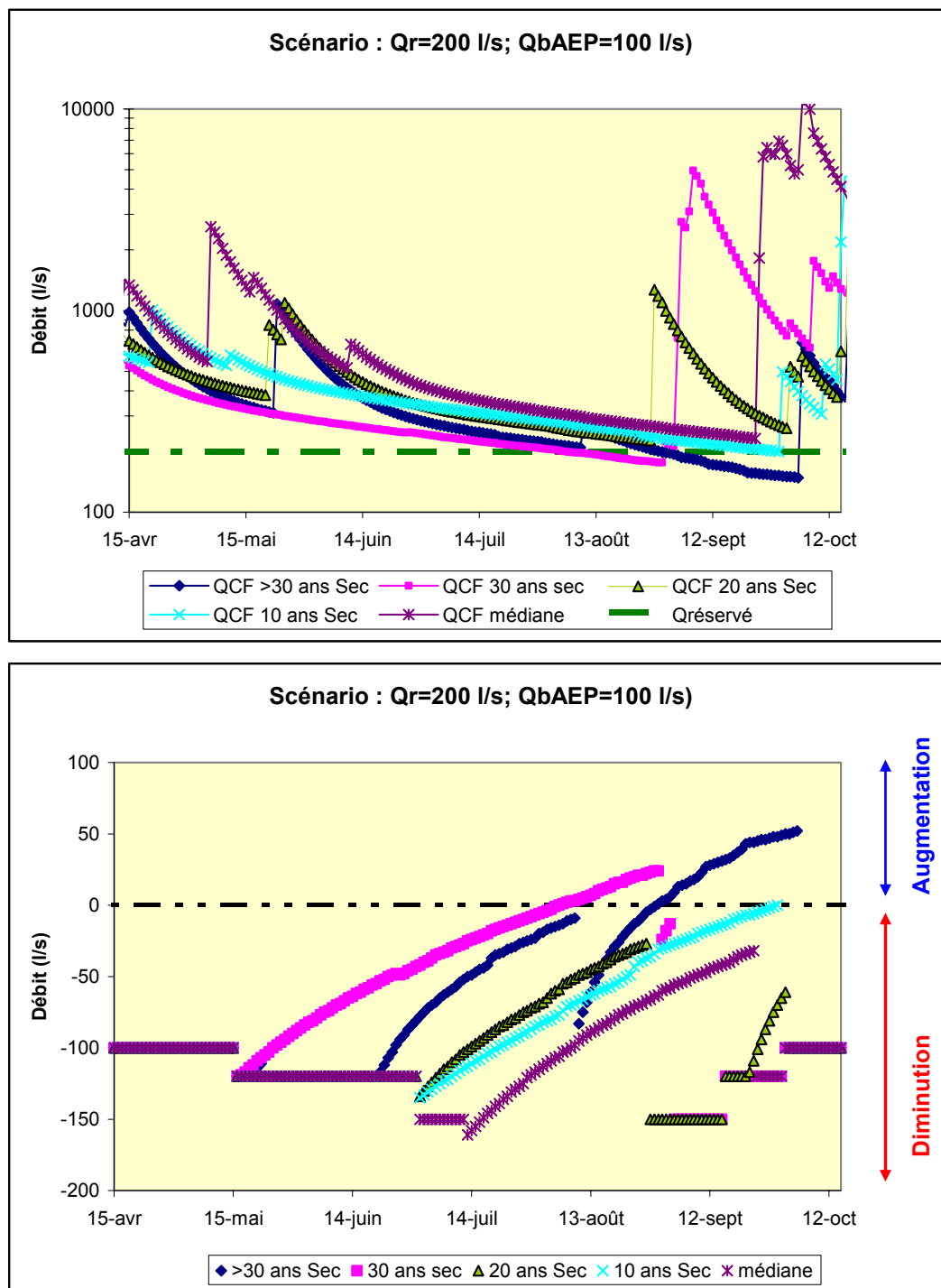


Illustration 49 - Evolution des débits naturels de la source des Cent Fonts pour différents contextes hydroclimatiques et évolution temporelle de la différence d'écoulement engendrée par les pompages par rapport aux situations naturelles. Scénario : $Q_r = 200$ l/s, $Q_{bAEP} = 100$ l/s, données d'entrées du run 3.

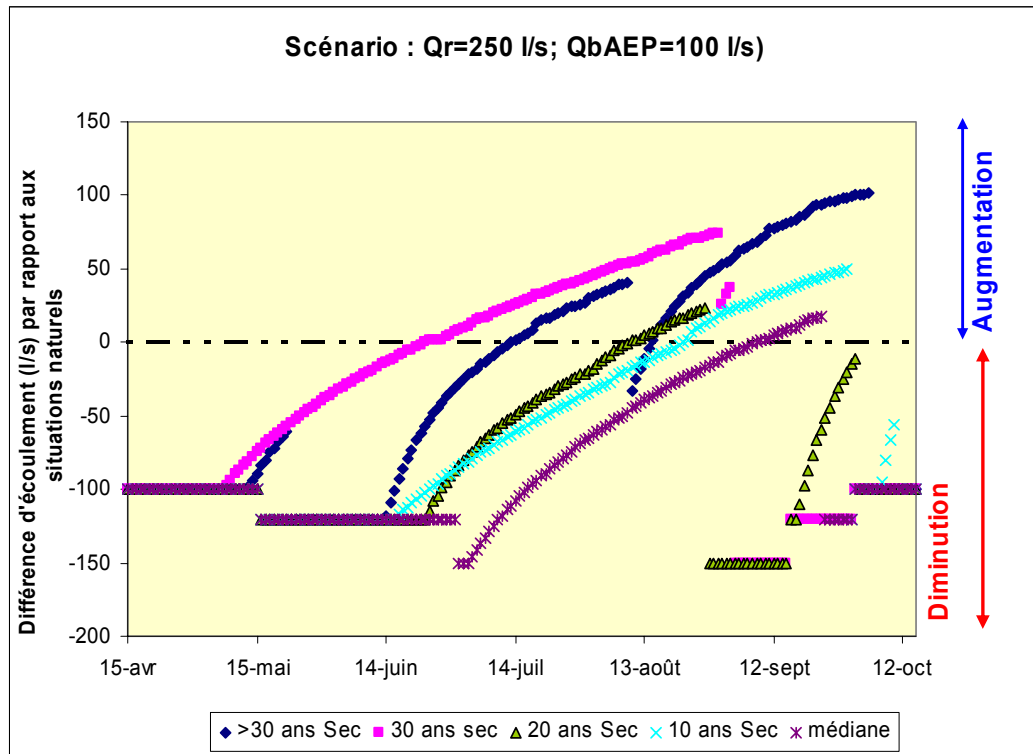


Illustration 50 - Evolution de la différence d'écoulement engendrée par les pompages par rapport aux situations naturelles (différents contextes hydroclimatiques sont considérés). Scénario : $Q_r=250$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s, données d'entrées du run 3)

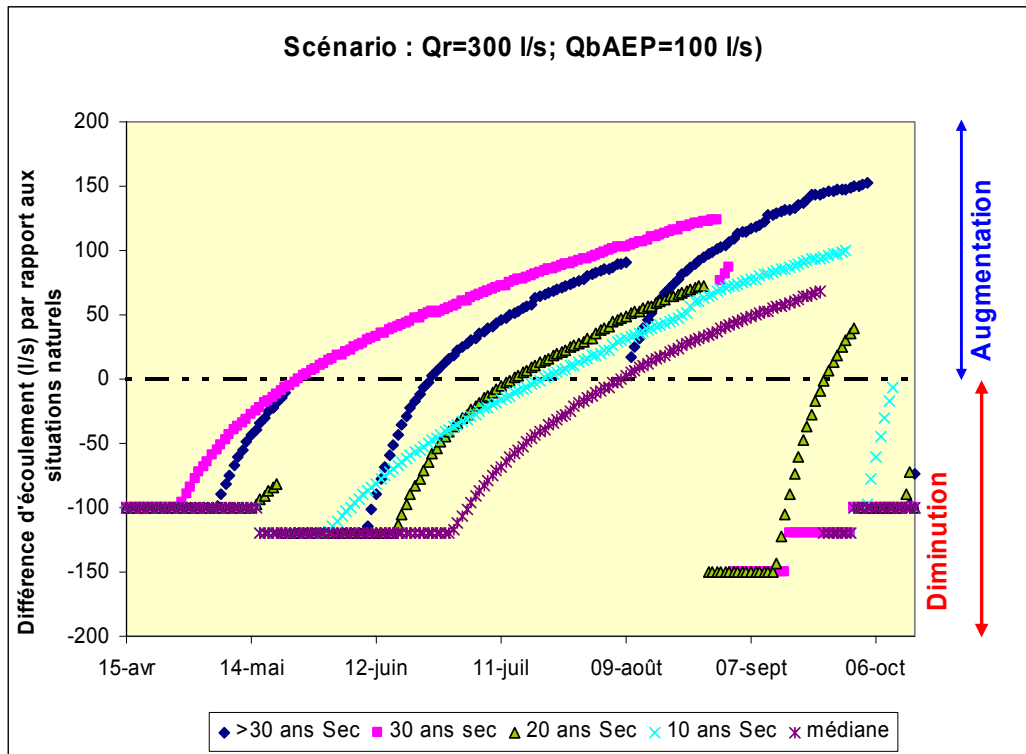


Illustration 51 - Evolution de la différence d'écoulement engendrée par les pompages par rapport aux situations naturelles (différents contextes hydroclimatiques sont considérés). Scénario : $Q_r=250$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s, données d'entrées du run 3)

Nous présentons en Illustration 52, Illustration 53 et Illustration 54 l'évolution de la piézométrie minimale calculée par le modèle piézométrique Tempo pour la semaine de pointe du mois d'août en fonction du débit de sollicitation des réserves du karst, du débit de pompage et du contexte hydrologique, que l'on renseigne à partir du débit qu'aurait naturellement présenté le système en absence de pompage. Le tableau de données associé à ces illustrations est présenté en annexe ?

La piézométrie évolue de manière inversement proportionnelle au débit de sollicitation des réserves du karst, les plus faibles valeurs de la piézométrie étant atteinte pour les plus fortes sollicitations. Sur la base de ces résultats, on remarque que le niveau piézométrique atteint lors de la semaine de pointe est inférieur à la cote minimale à ne pas dépasser au forage actuel pour certains des scénarios et/ou contextes hydrologiques. Les plus faibles niveaux piézométriques calculés pour chaque scénario considéré sont observés pour les cycles hydrologiques les plus secs (fortement déficitaires en recharge).

Sur la base de l'ensemble des scénarios étudiés par l'approche Tempo, nous avons construit un tableau synthétique (Tableau 7) qui indique si les scénarios considérés sont réalisables en fonction des possibilités (1) de l'ouvrage actuel et (2) dans l'hypothèse d'un nouveau forage plus profond de 30 m par rapport à l'existant (forage F3). Ce tableau rassemble les résultats obtenus pour les cycles hydrologiques de

fréquence d'occurrence « année médiane », « 10 ans sec », « 20 ans sec », « 30 ans sec » et « >30ans sec ».

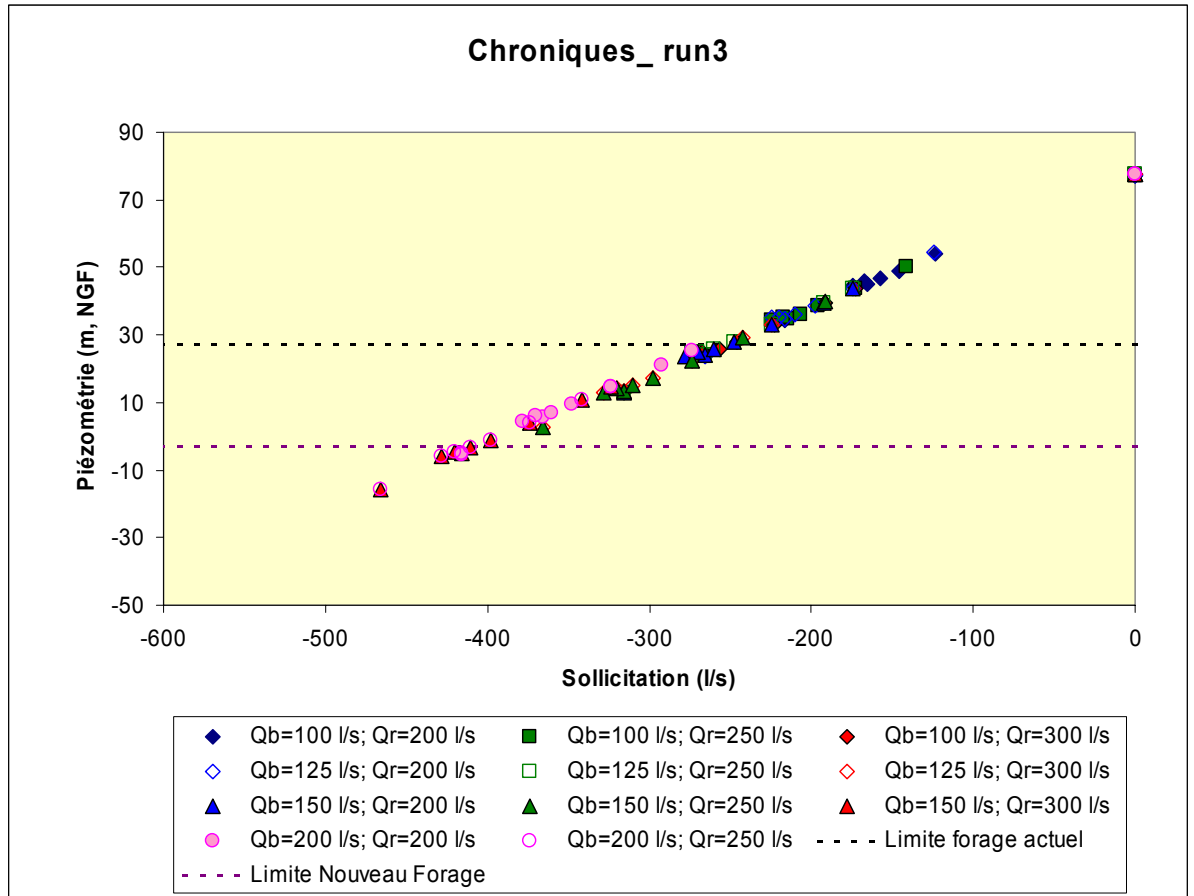


Illustration 52 - Evolution de la piézométrie minimale de la semaine de pointe d'août calculée par le modèle Tempo en fonction du débit de sollicitation des réserves du karst (11 combinaisons d'entrée (Qr, QbAEP) ont été considérées, chroniques d'entrées hydrologique du run 3).

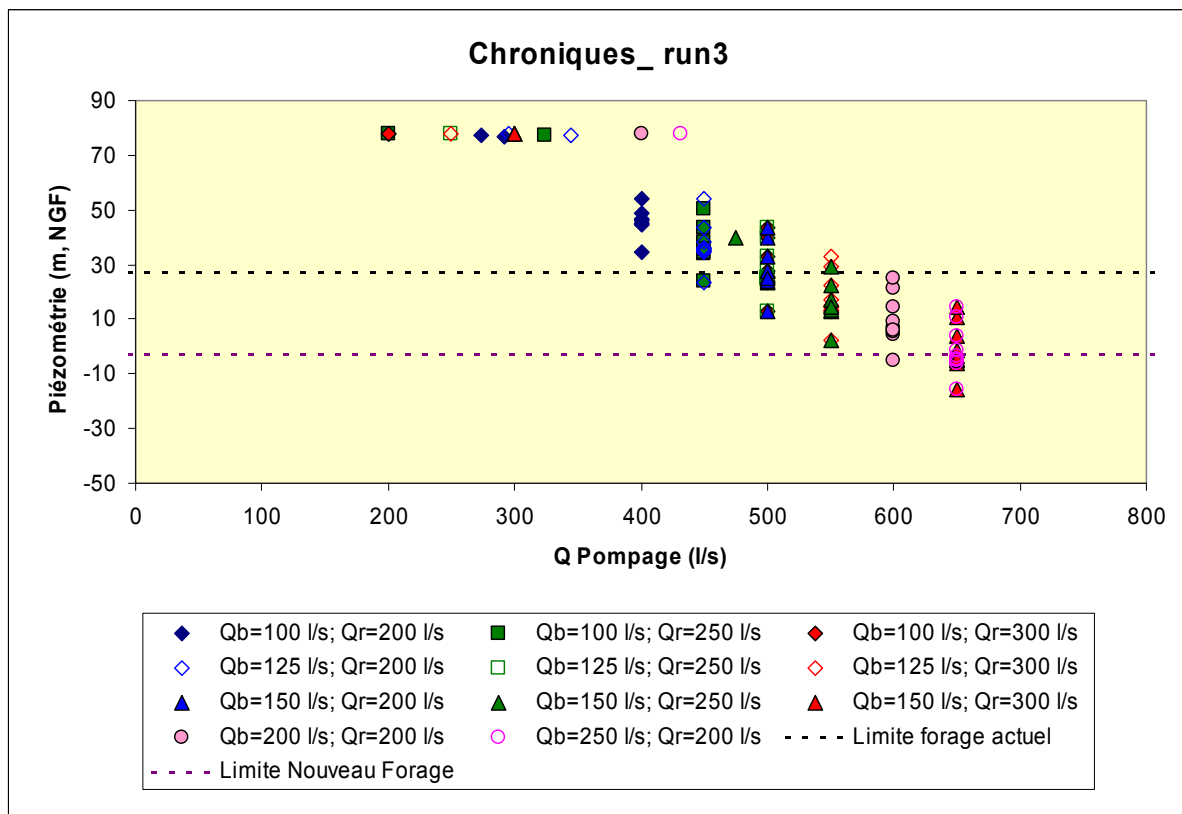


Illustration 53 - Evolution de la piézométrie minimale de la semaine de pointe d'août calculée par le modèle Tempo en fonction du débit de pompage (11 combinaisons d'entrée (Qr, QbAEP) ont été considérées, chroniques d'entrées hydrologique du run 3).

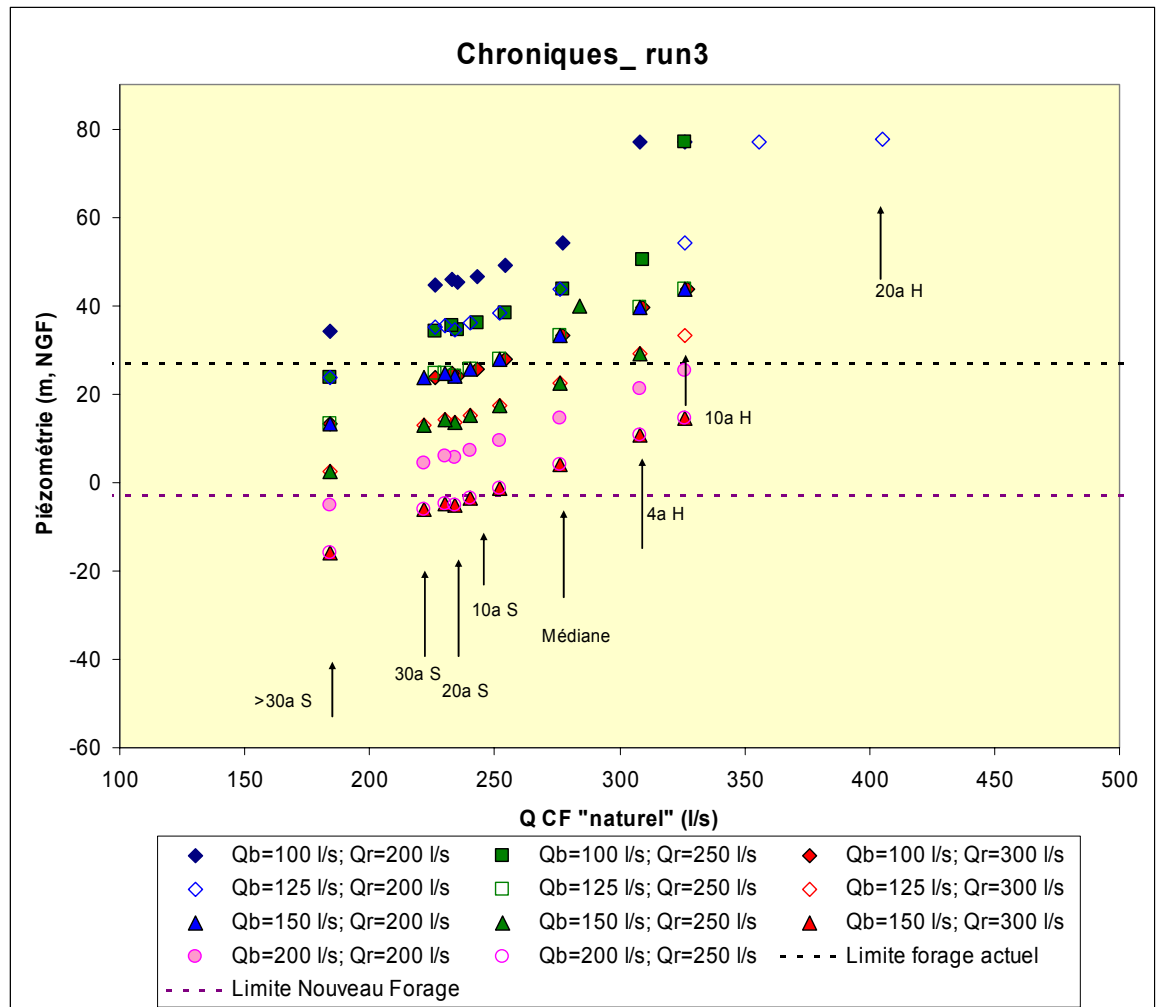


Illustration 54 - Evolution de la piézométrie minimum de la semaine de pointe d'août calculée par le modèle Tempo en fonction du débit de pompage (11 combinaisons d'entrée (Qr, QbAEP) ont été considérées, chroniques d'entrées hydrologique du run 3).

La synthèse des résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel TEMPO, considérant 5 contextes hydrologiques distincts, présentée au tableau 7 amène les commentaires suivants :

Le scénario ($Q_r=200$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 400 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel (F3) quels que soient les contextes hydrologiques considérés.

Le scénario ($Q_r=250$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 450 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel pour les cycles hydrologiques de probabilité d'occurrence inférieure ou égale à 30 ans « sec ». Pour les cycles extrêmes (probabilité d'occurrence > 30 ans « sec »), le forage actuel ne conviendrait plus.

Le scénario ($Q_r=300$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 500 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel pour les cycles hydrologiques de probabilité d'occurrence inférieure ou égale à 10 ans « sec ». Pour les cycles hydrologiques plus déficitaires en recharge (probabilité d'occurrence > 10 ans « sec »), le forage actuel ne permettrait pas de satisfaire la demande.

Le scénario ($Q_r=200$ l/s, $Q_{bAEP}=125$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 450 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel quels que soient les contextes hydrologiques considérées.

Ces premiers résultats permettent donc de montrer que la condition de débit (Q_r) à réserver à l'Hérault à plus de poids que la variable QAEP dans la fonction de pompage. Lorsque le débit de pompage devient supérieur à 500 l/s lors de la période estivale, le forage actuel ne permet plus de répondre aux besoins des scénarios considérés dans les contextes hydrologiques de probabilité d'occurrence supérieure à 10 ans « sec ».

Les scénarios [($Q_r=300$ l/s, $Q_{bAEP}=125$ l/s), ($Q_r=250$ l/s, $Q_{bAEP}=150$ l/s)] qui conduiraient à pomper jusqu'à 550 l/s lors des semaines de pointes seraient réalisables pour autant qu'un nouvel ouvrage de 30 m plus profond par rapport à l'existant soit mis en place, ceci quels que soient les contextes hydrologiques considérés.

Les scénarios [($Q_r=300$ l/s, $Q_{bAEP}=150$ l/s), ($Q_r=200$ l/s, $Q_{bAEP}=200$ l/s)] qui conduiraient à pomper jusqu'à 600 l/s lors des semaines de pointes seraient réalisables en ayant recours à un nouvel ouvrage, plus profond que le premier dans les contextes hydrologiques de probabilité d'occurrence inférieure ou égale à 20 ans « sec ».

Le scénario [($Q_r=250$ l/s, $Q_{bAEP}=200$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 650 l/s lors des semaines de pointes seraient réalisables à l'aide d'un nouvel ouvrage plus profond seulement dans les contextes hydrologiques de probabilité d'occurrence dite « médiane ».

Le scénario [($Q_r=300$ l/s, $Q_{bAEP}=200$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 700 l/s lors des semaines de pointes n'apparaît pas réalisable même à l'aide d'un nouvel ouvrage plus profond.

5.3. INTER-COMPARAISON DES RESULTATS DES MODELES

Sur la base des résultats de Tempo, un certain nombre de scénarios de pompage (fonction de pompage) a été sélectionné pour l'approche de modélisation numérique développée sous Matlab/Simulink. Nous présentons ici les résultats de l'intercomparaison des modèles pour 26 situations différentes de pompage. Cinq situations hydrologiques types distinctes ont été examinées : contexte hydrologique de type « d'année médiane », de type « 10 ans sec », de type « 20 ans sec », de type « 30 ans sec » et de type « > 30 ans Sec ». Neuf combinaisons possibles de pompage (Q_r , Q_{bAEP}) ont été étudiées. Nous présentons ci-dessous les évolutions temporelles de la piézométrie calculée par les deux modèles pour la combinaison ($Q_r=200$ l/s ; $Q_{bAEP}=100$ l/s) pour les situations hydrologiques types distinctes décrites précédemment. Les résultats des autres scénarios considérés sont présentés en annexe 4.

L'illustration 55 présente l'évolution temporelle de la piézométrie calculée par les deux modèles en contexte hydrologique « médian ». Pour ce scénario, la fonction de sollicitation des réserves du karst commence vers le 12 août, se termine vers le 23 septembre et coïncide à la date des premières crues de la période automnale. Lors des 3 premières semaines de sollicitation des réserves du karst, la piézométrie calculée par le modèle Tempo apparaît inférieure à celle calculée par le modèle numérique développé sous Matlab/Simulink. On observe là un phénomène comparable à celui mis en évidence dans le chapitre 4 lors de l'inter-comparaison des résultats des approches de simulation. Lors de la 4^{ème} semaine de sollicitation des réserves du karst, les piézométries calculées par les deux modèles sont comparables. A partir de la 5^{ème} semaine de pompage, on observe une divergence entre les deux modèles, le modèle numérique conduisant à des rabattements plus importants que ceux calculés par le modèle Tempo. Un phénomène identique est observé pour les autres contextes hydrologiques considérés (Illustration 56, Illustration 57, Illustration 58 et Illustration 59), la différence entre les modèles s'accroissant lorsque la durée des périodes de sollicitation des réserves augmentent (>> 1 mois) et lorsque le débit de pompage devient supérieur à 500 l/s (cf. illustrations de l'annexe 4). Les modèles qui ont été calibrés pour un mois de sollicitation à un débit de pompage de 400 l/s présentent donc des différences significatives en extrapolation pour des périodes de sollicitation supérieures à un mois. Le modèle numérique développé sous Matlab/Simulink apparaît plus pessimiste que le modèle Tempo lorsque la durée de sollicitation des réserves dépasse 1 mois et lorsque le débit de pompage est supérieur à 500 l/s.

De la même façon que pour l'approche Tempo, nous avons construit un tableau synthétique (Tableau 8) qui indique si les scénarios considérés sont réalisables en fonction des possibilités (1) de l'ouvrage actuel et (2) dans l'hypothèse d'un nouveau forage plus profond de 30 m par rapport à l'existant (forage F3). Ce tableau rassemble les résultats obtenus pour les cycles hydrologiques de fréquence d'occurrence « année médiane », « 10 ans sec », « 20 ans sec », « 30 ans sec » et « >30ans sec ».

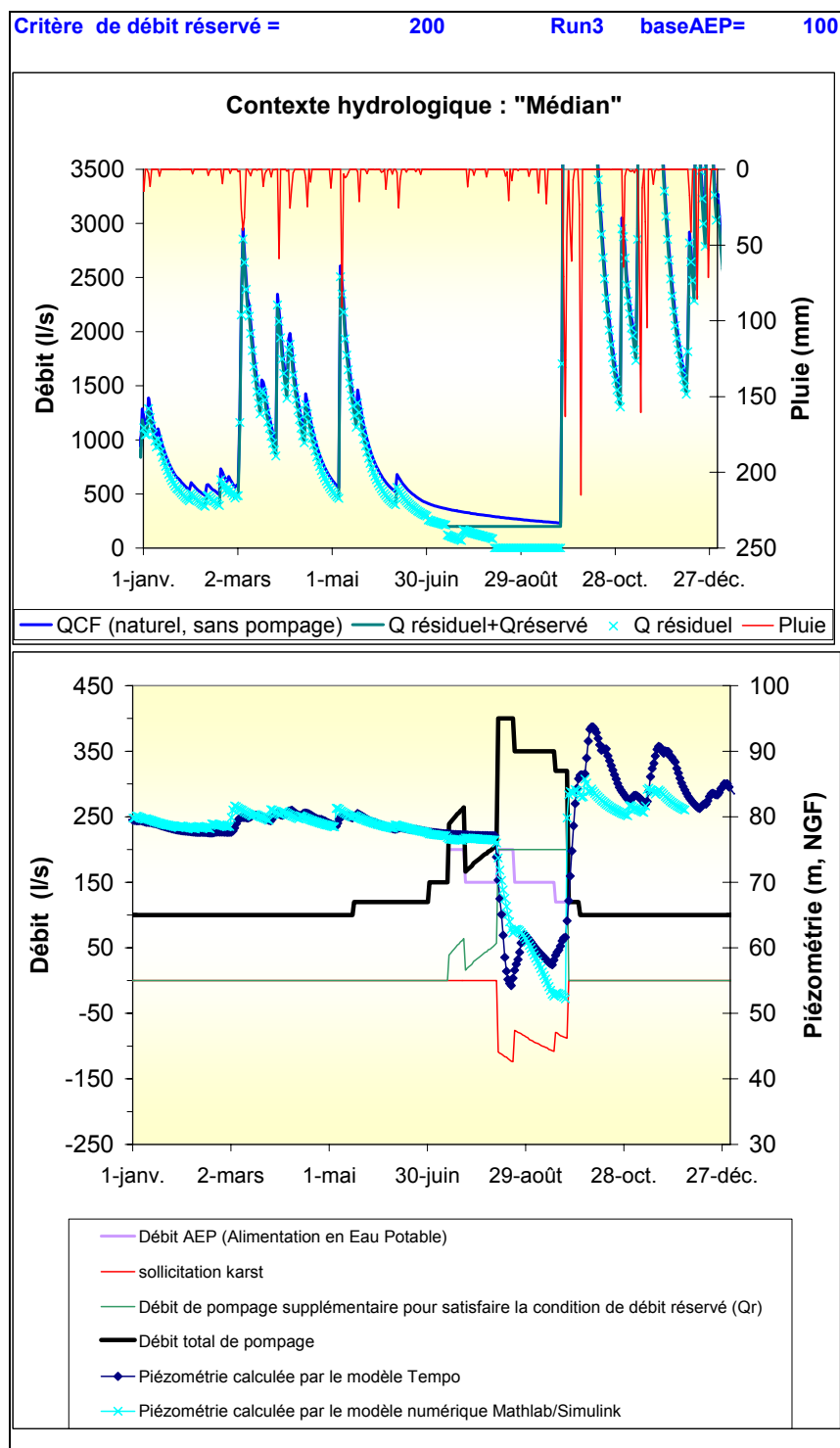


Illustration 55 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique « Médian » (Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s). L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée

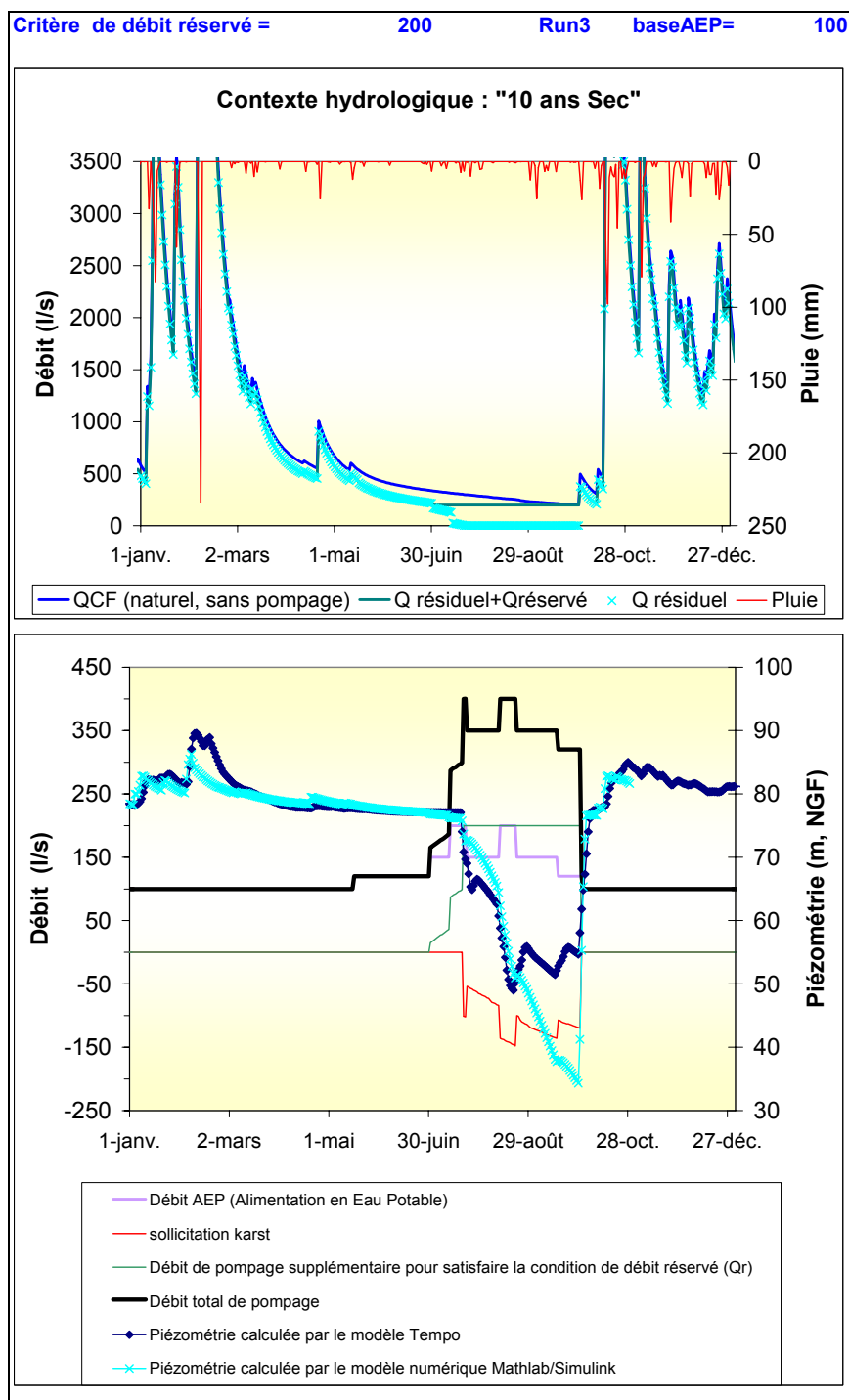


Illustration 56 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans sec, mois d'été » suivi d'une première crue tardive (début octobre) : Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s. L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée

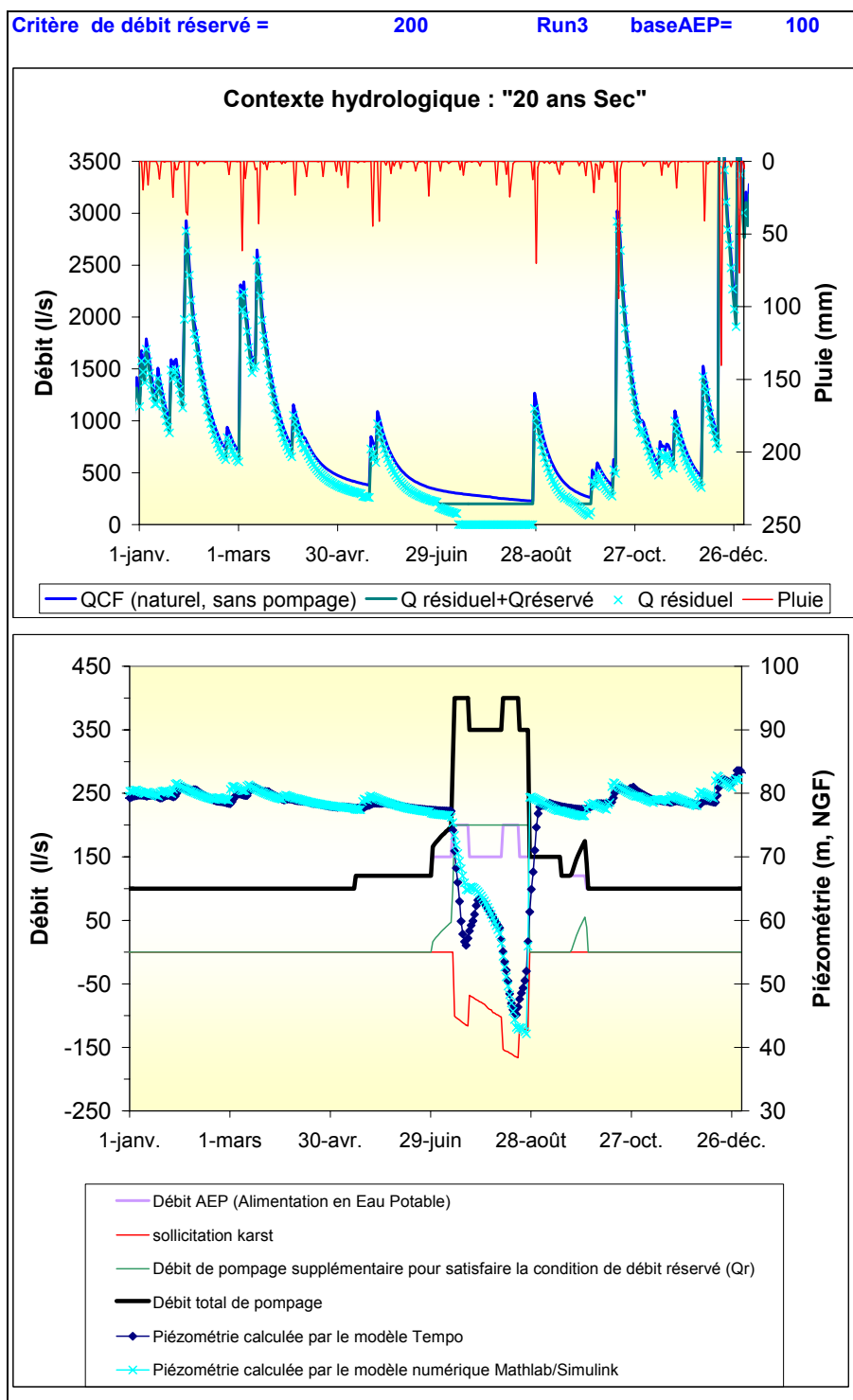


Illustration 57 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 20 ans sec, mois d'été » suivi d'une première crue précoce (début septembre) : Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s). L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée

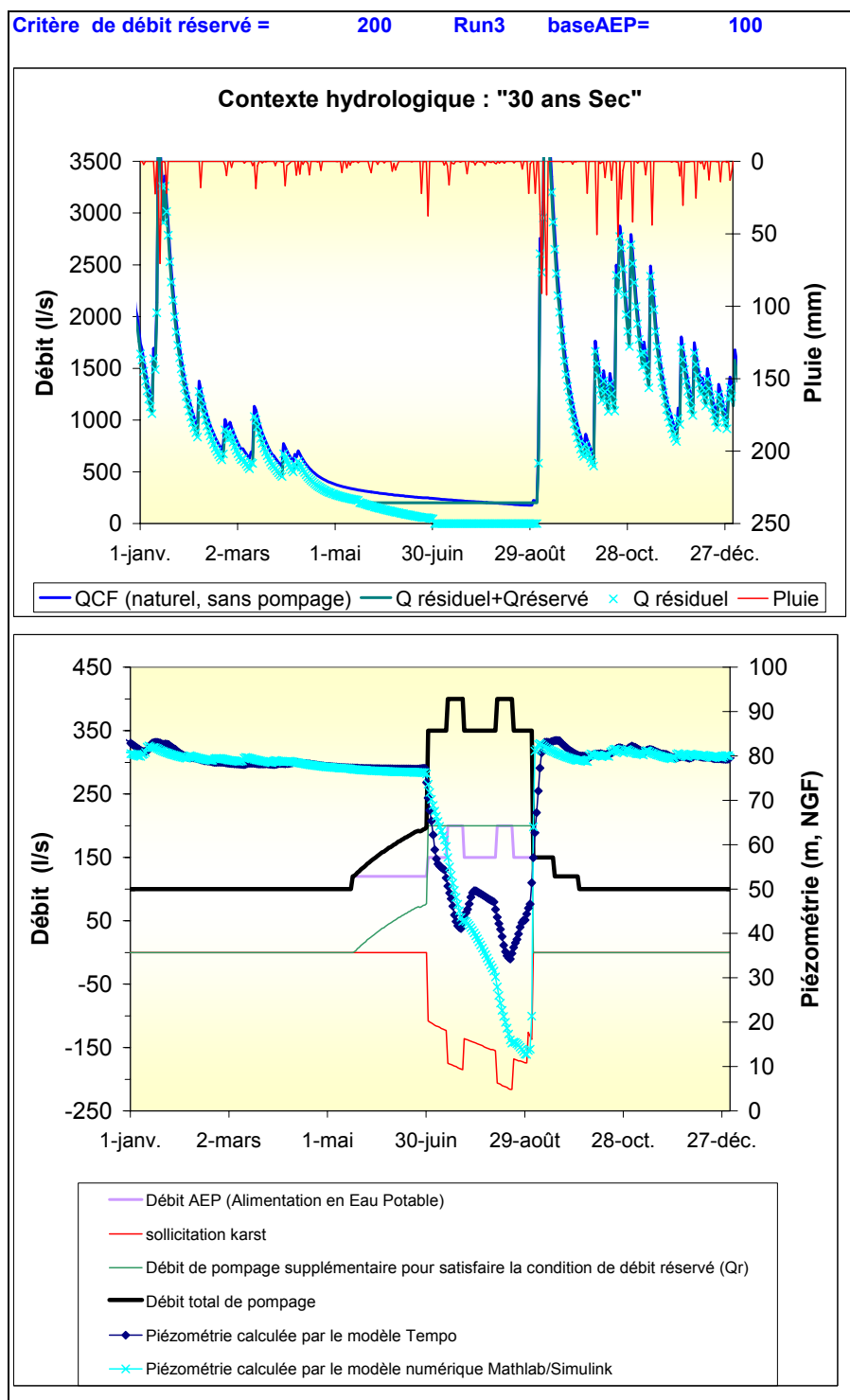


Illustration 58 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 30 ans sec, mois d'été » suivi d'une crue précocse (début septembre) : Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 100 l/s. L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée

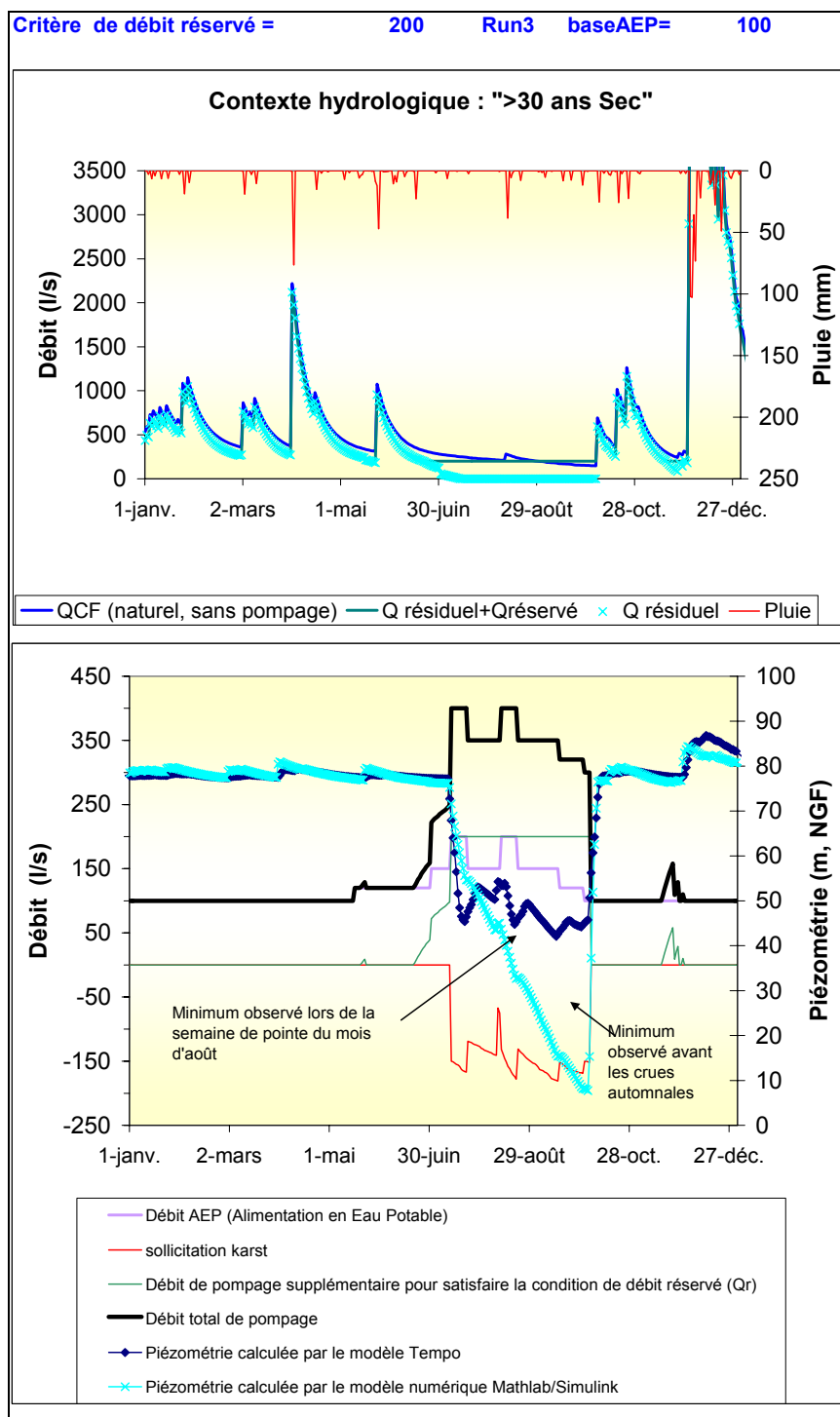


Illustration 59 - Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « >30 ans sec, mois d'été », suivi d'une crue tardive (début octobre) : Scénario : Q_{réservé} = 200 l/s, Q_{base AEP} = 100 l/s. L'évolution des données d'entrées et du débit résiduel des Cent Fonts est également reportée

Tableau 8 - Synthèse des résultats des simulations réalisées à l'aide du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink (5 contextes hydrologiques distincts sont considérés)

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"		10 ans "sec"		20 ans "sec"		30 ans "sec"		> 30 ans "sec"	
	Semaine de pointe du mois d'août	Crues automnales après le 1er octobre*	Semaine de pointe du mois d'août	Crues automnales après le 1er octobre*	Semaine de pointe du mois d'août	Crues automnales après le 1er octobre*	Semaine de pointe du mois d'août	Crues automnales après le 1er octobre*	Semaine de pointe du mois d'août	Crues automnales après le 1er octobre*
Scénarios										
Q _r =200 l/s Q _b AEP=100 l/s	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	non, forage actuel	non, forage actuel	non, forage actuel
Q _r =250 l/s Q _b AEP=100 l/s	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	oui, avec nouveau forage (+30 m)
Q _r =300 l/s Q _b AEP=100 l/s	oui, forage actuel	oui, forage actuel	non, forage actuel	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	non, forage actuel	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, Piézo < à -3 m NGF
Q _r =200 l/s Q _b AEP=125 l/s	oui, forage actuel	oui, forage actuel	oui, forage actuel	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, Piézo < à -3 m NGF
Q _r =250 l/s Q _b AEP=125 l/s	oui, forage actuel	non, forage actuel	non, forage actuel	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, Piézo < à -3 m NGF
Q _r =300 l/s Q _b AEP=125 l/s	non, forage actuel	non, Piézo < à -3 m NGF	non, forage actuel	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, forage actuel	oui, avec nouveau forage (+30 m)	non, Piézo < à -3 m NGF
Q _r =200 l/s Q _b AEP=150 l/s	oui, forage actuel	non, forage actuel	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé
Q _r =250 l/s Q _b AEP=150 l/s	non, forage actuel	non, Piézo < à -3 m NGF	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé
Q _r =300 l/s Q _b AEP=150 l/s	non, forage actuel	non, Piézo < à -3 m NGF	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé	Non testé

* L'étéage se prolonge jusqu'à la fin septembre

La synthèse des résultats des simulations réalisées à l'aide du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink, considérant 5 contextes hydrologiques distincts, présentée au Tableau 8 amène les commentaires suivants :

Le scénario ($Q_r=200$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 400 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel (F3) pour les cycles hydrologiques de probabilité d'occurrence inférieure ou égale à « 20 ans sec ». Pour les cycles extrêmes (probabilité d'occurrence = « 30 ans sec », voire supérieure), le forage actuel ne conviendrait plus. Le scénario serait réalisable dans l'optique d'un nouvel ouvrage de 30 m plus profond par rapport à l'existant (forage F3).

Le scénario ($Q_r=250$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 450 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel pour les cycles hydrologiques de probabilité d'occurrence inférieure ou égale à « 10 ans sec ». Pour les cycles plus extrêmes (probabilité d'occurrence > « 10 ans sec »), le forage actuel ne conviendrait plus. Le scénario serait réalisable dans l'optique d'un nouvel ouvrage de 30 m plus profond par rapport à l'existant (forage F3), à l'exception du cycle probabilité d'occurrence supérieur à « 30 ans sec ».

Le scénario ($Q_r=300$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 500 l/s lors des semaines de pointe apparaît réalisable avec le forage actuel pour le cycle hydrologique de probabilité d'occurrence « médiane ». Pour les probabilités d'occurrence supérieures ou égales à « 10 ans sec », le forage actuel ne conviendrait plus. Le scénario serait réalisable dans l'optique d'un nouvel ouvrage de 30 m plus profond par rapport à l'existant (forage F3) si la probabilité d'occurrence du cycle hydrologique est inférieure ou égale à « 30 ans sec ». Pour une probabilité d'occurrence du cycle hydrologique supérieur à « 30 ans sec », le scénario n'apparaît pas réalisable à l'aide d'un nouvel ouvrage plus profond de 30 m par rapport à l'existant.

Les scénarios qui conduiraient à pomper plus de 550 l/s lors des semaines de pointe n'apparaissent pas réalisable avec le forage plus profond quels que soient les contextes hydrologiques considérés.

6. Exploitabilité de la ressource du système karstique des Cent Fonts

6.1. EXPLOITABILITE DU SYSTEME KARSTIQUE A PARTIR DE L'INTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE ET DES RESULTATS DE SCENARIOS DE GESTION

Différents scénarios de gestion ont été testés à l'aide de deux approches de modélisation pour cinq contextes hydrologiques contrastés et distincts. Il ressort des résultats que la condition de débit Q_r à réserver au fleuve Hérault apparaît comme une condition déterminante dans la gestion active du système karstique ; cette condition pèse un poids plus important que le débit QAEP dans la fonction de pompage utilisée dans les modèles. Cette condition de débit Q_r est une condition « limitante » pour une exploitabilité supérieure à 500 - 600 l/s pour l'AEP selon les contextes hydrologiques et les modèles.

L'exploitabilité du système karstique doit être discutée en termes de volumes exploitables selon les différents scénarios abordés ainsi que les contextes hydrologiques assortis de leur période d'occurrence. Les volumes exploitables ainsi que la durée maximale de sollicitation du système karstique (à partir du moment où les sources sont taries) sont présentés et discutés dans les paragraphes 6.1.1. et 6.1.2. considérant les résultats des deux approches de modélisation, les résultats de l'approche par TEMPO pouvant être qualifiés d'« optimistes », par rapport aux résultats par l'approche de simulation numérique à l'aide de Matlab/Simulink, plus « pessimistes ».

Les conditions de débit pour l'alimentation en eau potable (AEP) des différents scénarios simulés à l'aide des deux modèles numériques conduisent aux volumes de prélèvement annuel suivants (Tableau 9). Ces volumes sont compris entre 3.7 millions et 7.4 millions de m^3 par année.

Tableau 9 - volume annuel exprimé en millions de m^3 selon les différents scénarios de conditions de débit pour l'AEP.

Base AEP (l/s)	100	125	150	200
Semaine de pointe (l/s)	200	250	300	400
Volume annuel (million de m^3)	3.68	4.6	5.52	7.36

Considérant les conditions de débit à réserver au fleuve Hérault pour les différents scénarios, les volumes pompés annuels correspondants à (VAEP+VQr) peuvent être calculés. Ces volumes sont variables selon les cycles hydrologiques considérés (contexte hydrologique de type « d'année médiane », de type « 10 ans sec », de type « 20 ans sec », de type « 30 ans sec » et de type « > 30 ans Sec »). Ces volumes sont commentés, pour les résultats issus des deux approches de modélisation, dans les paragraphes suivants 6.1.2. et 6.1.3..

6.1.1. Exploitabilité du système karstique des Cent Fonts et impact quantitatif sur le débit de l'Hérault

Il est nécessaire de préciser la formulation du débit Qr à restituer à l'Hérault pour les deux démarches de simulation. Lorsque le débit résiduel des Cent Fonts devient inférieur à la condition de débit à réserver au fleuve et tant que les sources n'ont pas tari, le débit supplémentaire pompé qui est restitué au fleuve Hérault est uniquement constituée d'eau en provenance du système karstique des Cent Fonts, la différence de charge hydraulique entre le fleuve Hérault et le système karstique ne permettant pas une infiltration en provenance de l'Hérault. Lorsque les sources tarissent, le débit à réserver à l'Hérault n'est plus uniquement constitué d'eau du karst mais résulte d'un mélange entre l'eau du karst et l'eau du fleuve Hérault. Dans l'approche utilisée, on restitue entièrement le flux d'eau en provenance de l'Hérault (30 l/s), ce qui revient, pour une condition de débit à réserver, à diminuer le débit en provenance du karst. Ainsi la condition $Q_r = 200 \text{ l/s}$ est égale à $30 \text{ l/s (Hérault)} + 170 \text{ l/s (CF)}$, $Q_r = 250 \text{ l/s} = 30 \text{ l/s (Hérault)} + 220 \text{ l/s (CF)}$ et $Q_r = 300 \text{ l/s} = 30 \text{ l/s (Hérault)} + 270 \text{ l/s (CF)}$. En termes de qualité, le flux d'eau réservé à l'Hérault ne correspond pas aux proportions de mélange que l'on pourrait calculer de la formulation précédente, mais est fonction de la valeur du débit total de pompage. Par exemple, lors de la semaine de pointe du scénario $Q_{bAEP} = 100 \text{ l/s}$ - $Q_r = 200 \text{ l/s}$, le débit pompé est de 400 l/s, l'eau du débit réservé est constituée de 93.5% d'eau du karst ($1-30/400$) et non pas de 85% comme on pourrait le croire à partir de la relation $Q_r = 200 \text{ l/s} = 30 \text{ l/s (Hérault)} + 170 \text{ l/s (CF)}$.

De plus, il est nécessaire de prendre en considération l'impact de l'exploitation du système karstique des Cent Fonts sur le fleuve Hérault en termes de quantité d'eau restituée par rapport au débit du fleuve. Pour ce faire, nous avons considéré d'une part, les informations disponibles dans la banque Hydro au Moulin de Bertrand sur la période 1967-1981 et d'autre part, les données de débit du Moulin de Bertrand sur la période 1998-2005. Concernant les données de la période 1998-2005, les données communiquées⁹ ont fait l'objet de différents traitements dans le but de les rendre valorisables. Les méthodes utilisées pour reconstituer l'évolution des débits de l'Hérault à l'amont des sources des Cent Fonts entre 1998 et 2005 est explicitée dans l'annexe 7. L'évolution temporelle des débits des Cent Fonts et de l'Hérault à l'amont des sources est présentée en annexe 7.

⁹ Données dite « brutes », non validées à ce jour, du CESML transmis par le CG34 dans le cadre de la présente étude.

Pour les données de la Banque Hydro (période 1967-1981), nous avons considéré la valeur du QMNA5 (quinquennal sec) déterminée : $QMNA5 = 3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ [$2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ - $3.7 \text{ m}^3/\text{s}$].

La chronique du débit de l'Hérault au Moulin Bertrand estimé (cf. annexe 7) permet de calculer des valeurs moyennes mensuelles de débit à l'amont des sources des Cent Fonts pour les mois de juillet et d'août. A noter que la chronique du débit de l'Hérault au Moulin de Bertrand comporte deux principales lacunes, une entre juillet et décembre 1998 et l'autre entre février et décembre 2001 (illustration 41 en Annexe 7). L'analyse statistique sommaire effectuée à partir de ces données permet ainsi de renseigner le contexte hydrologique moyen des mois d'été (juillet et août). Sur la base des éléments de connaissance du système karstique des Cent Fonts, nous avons considéré que les données de 2005 du fleuve Hérault sont représentatives d'un contexte hydrologique de type trentenal sec. L'incertitude sur les débits moyens apparaît plus importante que pour le cycle « 30 ans sec », les mesures et suivis réalisés en 2005 permettant de bien connaître les débits de ce type de contexte hydrologique. Les valeurs moyennes des débits pour les mois de juillet ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) et août ($4.3 \text{ m}^3/\text{s}$) sont comparables aux valeurs moyennes déterminées sur la période 1967-1981 (données de la Banque Hydro), soit respectivement $6.03 \text{ m}^3/\text{s}$ et $6.66 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les mois de juillet et août (cf. Annexe 7). Une analyse plus détaillée et sur un nombre de cycles hydrologiques plus importants concernant l'Hérault et spécifiquement sur les périodes d'étiage (juin-septembre) devra être conduite dans le futur afin de mieux définir cette variation ainsi que le débit à restituer à l'Hérault (l'étude de la définition de débit d'étiage de référence sera lancée en fin d'année 2006 dans le cadre du SAGE Hérault).

Le Tableau 11 et le Tableau 12 donnent, à titre indicatif, les ordres de grandeur des débits du karst et du fleuve en amont et à l'aval immédiat des Cent Fonts, en condition naturel et dans l'hypothèse où le système est exploité, avec comme contrainte, un débit à réserver au fleuve Hérault de 170 l/s. Deux situations hydrologiques distinctes ont été considérées : (1) contexte hydrologique dit « moyen » et (2) contexte fortement déficitaire en recharge par les pluies de type « 30 ans sec » (probabilité d'occurrence). L'exploitation du système karstique des Cent Fonts conduirait, avec cette hypothèse de débit à réserver, à diminuer le débit moyen du mois de juillet du fleuve Hérault de 2.7 % à 4 % selon les contextes hydrologiques considérés. Pour le mois d'août, le débit moyen du fleuve Hérault serait diminué de 2.4% à 2.5% selon les contextes hydrologiques considérés. De manière globale, ce déficit d'eau apparaît inférieur à 5% sur les mois d'été (juillet et août) pour cette condition de débit à réserver au fleuve Hérault (170 l/s). Des conditions de débit à réserver supérieures à 170 l/s conduiraient à des diminutions plus faibles du débit de l'Hérault. Les déficits d'écoulement calculés pour l'Hérault dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer de 170 l/s apparaissent, par ailleurs, plus faible que l'erreur qui est associée à la mesure du débit de l'Hérault au Moulin de Bertrand (10 % au moins).

Tableau 10 - Variation du débit de l'Hérault (QMNA5 quinquenal sec) estimé à l'aval des Cent Fonts dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer égal à 170 l/s lorsque les sources des Cent Fonts tarissent du fait de l'exploitation du système par pompage (dQ correspond à l'incertitude).

QMNA5 quinquenal sec

	Amont Cent Fonts (Moulin Bertrand)	Cent Fonts	Aval Cent Fonts	variation
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	%
juillet "naturel"	3.40	0.32	3.72	
juillet si exploité	3.40	0.17	3.57	-4.00%
août "naturel"	3.40	0.26	3.66	
août si exploité	3.40	0.17	3.57	-2.50%

Tableau 11 - Variation de débit de l'Hérault estimé à l'aval des Cent Fonts (pour une année hydrologique « moyenne ») dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer égal à 170 l/s lorsque les sources des Cent Fonts tarissent du fait de l'exploitation du système par pompage (dQ correspond à l'incertitude).

Année "Médiane"

	Amont Cent Fonts (Moulin Bertrand)	Cent Fonts	Aval Cent Fonts	variation
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	%
juillet "naturel"	6.00	0.34	6.34	
dQ	2.00	0.03	2.67	
juillet si exploité	6.00	0.17	6.17	-2.70%
dQ	2.00	0.0085	2.37	
août "naturel"	4.30	0.28	4.58	
dQ	1.50	0.01	1.76	
août si exploité	4.30	0.17	4.47	-2.40%
dQ	1.50	0.01	1.89	

Tableau 12 - Variation du débit de l'Hérault estimé à l'aval des Cent Fonts (pour une année hydrologique de sécheresse trentenal) dans l'hypothèse d'un débit réservé à restituer égal à 170 l/s lorsque les sources des Cent Fonts tarissent du fait de l'exploitation du système par pompage (dQ correspond à l'incertitude).

Année "30ans Sec", situation mesurée en 2005

	Amont Cent Fonts (Moulin Bertrand)	Cent Fonts	Aval Cent Fonts	variation
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	%
juillet "naturel"	2.50	0.27	2.77	
<i>dQ</i>	0.50	0.02	0.76	
juillet si exploité	2.50	0.17	2.67	-3.60%
<i>dQ</i>	0.30	0.0200	0.59	
août "naturel"	1.80	0.22	2.02	
<i>dQ</i>	0.20	0.01	0.32	
août si exploité	1.80	0.17	1.97	-2.50%
<i>dQ</i>	0.20	0.02	0.42	

Les éléments d'information donnée dans ce rapport au sujet de l'évaluation de l'impact d'une exploitation du karst des Cent Fonts sur le fleuve Hérault sont présentés à titre indicatif. Une étude détaillée des débits d'étiage du fleuve Hérault en amont des sources devra être nécessairement conduite afin de préciser les valeurs des « déficits » présentés dans les tableaux 10, 11 et 12, ainsi que l'incertitude sur le débit de l'Hérault qui est importante pour les données disponibles.

Afin d'enrichir le débat, l'étude d'impact menée sur les Cent Fonts (cf. § 5.2) indique que des conditions de débits réservés importantes pourraient conduire, lors des cycles hydrologiques fortement déficitaires, à un soutien artificiel du débit du fleuve Hérault par le débit réservé des Cent Fonts en fin d'étiage, notamment pour des conditions de débit réservé (Qr) supérieures ou égales à 250 l/s.

6.1.2. Exploitabilité du système karstique des Cent Fonts à partir des résultats du modèle TEMPO

Les volumes annuels (du 01 janvier au 31 décembre) – volume total pompé, volume pompé pour Qr et volume sollicité au sein du système karstique lorsque les sources sont taries – ont été calculés pour les différents scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO ainsi que pour les 5 probabilités d'occurrence du contexte hydrologique. De même, la durée de sollicitation du système (durée de la période pendant laquelle les sources des Cent Fonts sont taries), exprimée en jours pour les différents scénarios et probabilités d'occurrence, a été calculée. L'ensemble de ces données sont représentés au sein de tableaux de synthèse.

Ces tableaux de synthèse (Tableau 14, Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 17) permettent de faire les commentaires suivants :

Avec le dispositif actuel, le scénario qui conduirait à pomper 200 l/s en semaine de pointe et à réserver un débit inférieur ou égal à 250 l/s au fleuve Hérault conduirait à

pomper un volume annuel compris entre 4.5 et 5.5 millions de m^3 pour l'ensemble des contextes hydrologiques (débit total maximal de pompage en période de pointe de 450 l/s). Les volumes annuels maximaux sont observés pour les contextes hydrologiques fortement déficitaires en précipitation (d'occurrence supérieure ou égale à « 30 ans sec »).

Avec le dispositif actuel et pour un débit total de 500 l/s en période de pointe, le volume annuel pompé peut dépasser 6 millions de m^3 ; néanmoins les scénarios ne pourront pas être satisfaits pour les cycles hydrologiques déficitaires de probabilité d'occurrence supérieure à 10 ans « sec ». Seul le scénario ($Q_r=200$ l/s et $Q_{bAEP}=125$ l/s) permettrait de disposer d'un volume annuel de 6,1 millions de m^3 , pour un contexte hydrologique d'une probabilité d'occurrence de 30 ans « sec » (4.6 millions de m^3 pour l'AEP). Le débit à restituer à l'Hérault est une contrainte à prendre en considération ; sa détermination est importante et permettra de sélectionner les scénarios possibles à mettre en œuvre.

Avec un nouveau forage plus profond de 30 mètres que le dispositif actuel testé, le volume annuel pompé pourrait atteindre 8 millions de m^3 pour plus de la moitié des scénarios testés et ce pour l'ensemble des conditions hydrologiques considérées. Le débit total d'exploitation (y compris en période de pointe) pourrait ainsi atteindre 550 l/s. Le débit à restituer à l'Hérault maximal est de 300 l/s, alors que le débit de base pour l'AEP ne dépasse pas 150 l/s (300 l/s en semaine de pointe), correspondant à un volume annuel de 5.52 millions de m^3 .

Pour les cycles extrêmement déficitaires en recharge (probabilité d'occurrence supérieure à 30 ans sec), ni le dispositif actuel ni un nouvel ouvrage plus profond de 30 m, ne permettrait d'obtenir un volume annuel supérieur à 8.5 millions de m^3 et atteignant plus de 10 millions de m^3 . Seul le scénario ne dépassant pas le débit total de 600 l/s ($Q_r=200$ l/s et $Q_{b\_AEP}=200$ l/s) permettrait, avec un nouvel ouvrage, de produire plus de 9 millions de m^3 dans un contexte extrêmement déficitaire de probabilité d'occurrence égal, à 30 ans « sec », dont 7.36 millions de m^3 pour l'AEP.

Le pourcentage de volume d'eau du système des Cent Fonts à restituer à l'Hérault est compris, pour les différents scénarios, entre 20 et 40% par rapport au volume total pompé. Le volume annuel sollicité au sein du système karstique lorsque les sources tarissent est exprimé au sein du Tableau 15, tout comme la durée de cette sollicitation (Tableau 16). Celle-ci est d'autant plus grande que la probabilité d'occurrence est grande ; ainsi pour le scénario $Q_r=200$ l/s et $Q_{b\_AEP}=100$ l/s, la durée de sollicitation exprimée en jours atteint plus de 80 jours pour la probabilité d'occurrence supérieure à 30 ans « sec ». Le volume annuel sollicité sur le système karstique exprimé en millions de m^3 correspond au volume sollicité sur le système karstique alors que celui-ci ne permet plus un écoulement naturel au niveau des griffons ; pour les scénarios correspondant à une exploitation possible avec le forage actuel, et pour un débit total n'excédant pas 450 l/s, le volume annuel sollicité n'excède pas de 1.4 millions de m^3 pour des conditions hydrologiques caractérisées par une probabilité d'occurrence inférieure à 30 ans « sec ». Pour le scénario $Q_r=200$ l/s et $Q_{bAEP}=100$ l/s, le volume sollicité pour une probabilité d'occurrence du contexte hydrologique de plus de 30 ans « sec » correspond à 21 % du volume total pompé. Pour les scénarios $Q_r=250$ l/s et

$Q_{bAEP}=100$ l/s et $Q_r=200$ l/s et $Q_{bAEP}=125$ l/s, pour une probabilité d'occurrence du contexte hydrologique «Trentenal sec », le volume sollicité correspond entre 20 et 22 % du volume total pompé sur une année calendaire (01 janvier au 31 décembre).

Tableau 13 - Volume total pompé exprimé en millions de m3, pour les scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	4.5	5.0	4.5	5.0	5.3
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	4.9	5.5	4.8	5.5	5.9
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	5.4	6.0	5.3	6.2	6.6
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	5.8	6.0	5.5	6.1	6.4
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	6.3	6.9	4.8	6.7	7.0
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	6.9	7.7	5.1	7.4	7.9
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	7.0	7.4	5.6	7.2	7.4
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	7.5	8.1	5.9	7.9	8.2
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	8.0	8.9	6.3	8.5	9.1
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	9.1	9.6	7.9	9.3	9.7
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	9.6	10.3	8.6	9.9	10.5
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	10.2	11.1	9.5	10.6	11.5

* volume cumulé du 01 janvier au 31 décembre, les couleurs se réfèrent aux interprétations de Tempo

oui, Forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF
-----------------------	---	-------------------------------

Tableau 14 - Volume annuel pompé et restitué en débit réservé (Qr) résultant des simulations effectuées à l'aide de l'approche TEMPO pour les différents scénarios.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	0.85	1.32	0.85	1.27	1.59
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	1.18	1.81	1.17	1.78	2.26
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	1.67	2.33	1.59	2.54	2.96
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	1.23	1.43	0.92	1.46	1.78
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	1.69	2.33	0.17	2.13	2.41
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	2.26	3.14	0.52	2.83	3.25
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	1.49	1.87	0.09	1.70	1.89
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	2.00	2.62	0.38	2.36	2.73
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	2.51	3.41	0.81	3.01	3.63
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	1.73	2.24	0.53	1.97	2.34
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	2.26	2.98	1.26	2.54	3.18
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	2.83	3.76	2.10	3.22	4.13

* volume cumulé du 01 janvier au 31 décembre, les couleurs se réfèrent aux interprétations de Tempo

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF
-----------------------	---	-------------------------------

Tableau 15 - Volume annuel sollicité au sein du système karstique des Cent Fonts (à partir du tarissement des sources) pour les différents scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	0.4	0.7	0.4	0.9	1.1
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	0.5	1.1	0.6	1.2	1.6
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	0.9	1.4	0.9	1.7	2.0
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	0.7	1.0	0.6	1.2	1.5
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	1.0	1.3	0.9	1.7	1.9
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	1.4	1.8	1.3	2.2	2.5
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	1.0	1.3	0.9	1.6	1.8
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	1.3	1.8	1.2	2.1	2.4
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	1.7	2.2	1.6	2.7	3.1
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	1.6	2.0	1.5	2.4	2.8
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	2.0	2.6	1.9	2.9	3.4
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	2.3	3.2	2.4	3.5	4.1

* volume cumulé du 01 janvier au 31 décembre, les couleurs se réfèrent aux interprétations de Tempo

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF
-----------------------	---	-------------------------------

Tableau 16 - Durée de sollicitation du système karstique des Cent Fonts pour les différents scénarios simulés à l'aide de l'approche TEMPO.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	42	70	44	63	83
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	42	78	45	65	94
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	46	78	45	84	95
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	68	78	45	71	95
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	72	78	49	87	95
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	72	90	57	100	101
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	72	85	54	89	95
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	72	90	57	102	102
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	76	90	57	109	107
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	81	92	58	109	108
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	84	103	64	110	111
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	84	112	68	117	114

Les couleurs se réfèrent aux interprétations de Tempo

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF
-----------------------	---	-------------------------------

6.1.3. Exploitabilité du système karstique des Cent Fonts à partir des résultats du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink

Les volumes annuels (du 01 janvier au 31 décembre) – volume total pompé, volume pompé pour Qr et volume sollicité au sein du système karstique lorsque les sources sont tarées – ont été calculés pour les différents scénarios simulés à l'aide du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink ainsi que pour les 5 probabilités d'occurrence du contexte hydrologique. De même, la durée de sollicitation du système (durée de la période pendant laquelle les sources des Cent Fonts sont tarées), exprimée en jours pour les différents scénarios et probabilités d'occurrence a été calculée. L'ensemble de ces données est représenté au sein de tableaux de synthèse.

Ces tableaux de synthèse (Tableau 17, Tableau 18, Tableau 19 et Tableau 20) permettent de faire les commentaires suivants :

Avec le dispositif actuel, pour un débit Qr inférieur ou égal à 200 l/s et un débit de base pour l'alimentation en eau potable de 100 l/s (200 l/s en pointe) soit un débit total de pompage en période de pointe de 400 l/s, le volume annuel total pompé est de 4.5 millions de m³. Le scénario ne peut être satisfait pour les cycles très déficitaires (probabilité d'occurrence > à 20 ans sec). Les autres scénarios testés avec ce même dispositif, permettent d'extraire un volume annuel maximal de 5.8 millions de m³, mais pour une probabilité d'occurrence médiane du contexte hydrologique.

Avec un nouveau forage plus profond de 30 mètres que le dispositif actuel, le volume annuel pompé pourrait atteindre en moyenne 5.5 millions de m³ pour la moitié des scénarios testés et ce pour l'ensemble des conditions hydrologiques considérées. Le débit total d'exploitation (y compris en période de pointe) pourrait ainsi atteindre un maximum de 500 l/s. Le débit maxima à restituer à l'Hérault serait de 300 l/s, alors que le débit de base pour l'AEP ne dépasserait pas 125 l/s, correspondant à un volume annuel de 4.6 millions de m³.

Pour une probabilité d'occurrence de 30 ans sec du contexte hydrologique, le volume total pompé est compris entre 5 et 5.5 millions de m³, pour les deux scénarios suivants : (i) Qr=200 l/s et QbAEP=100l/s et (ii) Qr=250 l/s et QbAEP=100 l/s.

Pour une garantie de probabilité d'occurrence supérieure à 30 ans « sec », ni le dispositif actuel ni un nouvel ouvrage plus profond de 30m, ne permettraient d'obtenir un volume annuel supérieur à 5.3 millions de m³. Seul le scénario ne dépassant pas le débit total de 400 l/s (Qr=200 l/s et Qb_AEP=100 l/s) permettrait, avec un nouvel ouvrage, de produire plus de 5 millions de m³ pour une probabilité d'occurrence de 30 ans « sec », dont 4.7 millions de m³ pour l'AEP.

Le pourcentage de volume annuel d'eau du système des Cent Fonts à restituer à l'Hérault est compris pour les différents scénarios, entre 23 et 27% par rapport au volume total pompé. Le volume annuel sollicité au sein du système karstique lorsque les sources tarissent est exprimé au sein du Tableau 19, tout comme la durée de cette sollicitation (Tableau 20). Celle-ci est d'autant plus grande que la probabilité d'occurrence est grande ; ainsi, pour le scénario Qr=200 l/s et Qb_AEP=100 l/s, la

durée de sollicitation exprimée en jours atteint plus de 80 jours pour la probabilité d'occurrence supérieure à 30 ans « sec ». Le volume annuel sollicité sur le système karstique exprimé en millions de m³ correspond au volume sollicité sur le système karstique alors que celui-ci ne permet plus un écoulement naturel au niveau des griffons ; pour les scénarios correspondant à une exploitation possible avec le forage actuel, et pour un débit total n'excédant pas 400 l/s, le volume annuel sollicité n'excède pas 1.1 millions de m³ pour des conditions hydrologiques caractérisées par une probabilité d'occurrence jusqu'à plus de 30 ans « sec ». Pour le scénario Qr=200 l/s et QbAEP=100 l/s, le volume sollicité pour une probabilité d'occurrence du contexte hydrologique de plus de 30 ans « sec » correspond à 21 % du volume total pompé. Pour les scénarios Qr= 200 l/s et QbAEP=100 l/s et Qr=250 l/s et QbAEP=100 l/s, pour une probabilité d'occurrence du contexte hydrologique «Trentenal sec », le volume sollicité correspond entre 18 et 22 % du volume total pompé sur une année calendaire (01 janvier au 31 décembre).

Tableau 17 - Volume total annuel pompé pour les scénarios simulés à l'aide du modèle développé sous Matlab/Simulink.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3	Volume total pompé* million de m3
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	4.5	5.0	4.5	5.0	5.3
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	4.9	5.5	4.8	5.5	5.9
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	5.4	6.0	5.3	6.2	6.6
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	5.8	6.0	5.5	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	6.3	6.9	4.8	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	6.9	7.7	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	7.0	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	7.5	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	8.0	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé

* volume cumulé du 01 janvier au 31 décembre, les couleurs se réfèrent aux interprétations du modèle numérique Matlab/Simulink

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF	Non testé
-----------------------	---	-------------------------------	--------------

Tableau 18 - Volume annuel pompé et restitué en débit réservé (Qr) pour les différents scénarios simulés à l'aide du modèle numérique développé sous Matlab/Simulink.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3	Volume pompé pour Qr* million de m3
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	0.9	1.3	0.8	1.3	1.6
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	1.2	1.8	1.2	1.8	2.3
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	1.7	2.3	1.6	2.5	3.0
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	1.2	1.4	0.9	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	1.7	2.3	0.2	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	2.3	3.1	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	1.5	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	2.0	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	2.5	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé

* volume cumulé du 01 janvier au 31 décembre, les couleurs se réfèrent aux interprétations du modèle numérique Matlab/Simulink

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF	Non testé
-----------------------	---	-------------------------------	--------------

Nota : Les volumes restitués pour le contexte hydrologique « décennal sec » apparaissent supérieurs aux volumes restitués du contexte hydrologique « 20 ans sec ». Cette différence s'explique par le fait que le volume restitué est proportionnel à la durée de sollicitation des réserves. Pour le contexte hydrologique « 20 ans sec », la durée de sollicitation des réserves est faible (de l'ordre de 45 jours contre 78 jours environ) en raison de l'épisode de crue important généré à la fin du moi d'août (cf. Illustration 12 en annexe 4)

Tableau 19 - Volume annuel de sollicitation du système karstique des Cent Fonts (lors du tarissement des sources) pour les différents scénarios simulés à l'aide du modèle numérique Matlab/Simulink.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3	V sollicité* million de m3
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	0.4	0.7	0.4	0.9	1.1
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	0.5	1.1	0.6	1.2	1.6
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	0.9	1.4	0.9	1.7	2.0
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	0.7	1.0	0.6	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	1.0	1.3	0.9	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	1.4	1.8	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	1.0	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	1.3	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	1.7	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé

* volume cumulé du 01 janvier au 31 décembre, les couleurs se réfèrent aux interprétations du modèle numérique Matlab/Simulink

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF	Non testé
-----------------------	---	-------------------------------	--------------

Tableau 20 - Durée de sollicitation du système karstique des Cent Fonts par pompage, résultant des scénarios simulés à l'aide du modèle numérique Matlab/Simulink.

Probabilité d'occurrence du contexte hydrologique	année "Médiane"	Décenal "sec"	20 ans "sec"	Trentenal "sec"	> Trentenal "sec"
Scénarios	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour	durée de la sollicitation en jour
Qr=200 l/s QbAEP=100 l/s	42	70	44	63	83
Qr=250 l/s QbAEP=100 l/s	42	78	45	65	94
Qr=300 l/s QbAEP=100 l/s	46	78	45	84	95
Qr=200 l/s QbAEP=125 l/s	68	78	45	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=125 l/s	72	78	49	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=125 l/s	72	90	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=150 l/s	72	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=150 l/s	72	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=150 l/s	76	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=200 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=250 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé
Qr=300 l/s QbAEP=200 l/s	non testé	non testé	non testé	non testé	non testé

Les couleurs se réfèrent aux interprétations du modèle numérique Matlab/Simulink

oui, forage actuel	non, forage actuel oui, avec nouveau forage	non, Piézo < à -3 m NGF	Non testé
-----------------------	---	-------------------------------	--------------

6.2. INTER-COMPARAISON DES RESULTATS

Comme cela a été mentionné au paragraphe 5.3, les résultats des deux modèles sont divergents au-delà de la 5^{ème} semaine de pompage ; la différence entre les résultats des deux modèles s'accroît lorsque la durée de sollicitation des réserves augmente et devient supérieure à un mois. Les deux modèles calibrés sur une durée de un mois et à un débit de 400 l/s présentent ainsi des différences significatives lorsqu'ils sont en situation d'extrapolation pour des durées de sollicitation supérieure à un mois. Le modèle numérique développé sous Matlab/Simulink apparaît comme étant plus pessimiste que le modèle développé à l'aide de l'outil TEMPO. Ainsi, dans cette inter-comparaison, ne sont retenus que les résultats communs aux deux approches de modélisation numérique.

Les résultats communs aux deux modèles de simulation en termes d'exploitabilité sont les suivants :

- (i) Le dispositif actuel ou un nouvel ouvrage plus profond de 30 m permettrait d'assurer un débit pour l'AEP de 100 l/s (soit 200 l/s en période de pointe) pour toutes les conditions hydrologiques testées, y compris les cycles extrêmement déficitaires en recharge (probabilité d'occurrence de plus de 30 ans sec satisfaite). Le débit pompé restitué à l'Hérault serait de $Q_r=200$ l/s. La durée de sollicitation du système karstique serait de 83 jours. Le volume annuel pompé serait de 5.3 millions de m^3 .
- (ii) Le dispositif actuel ou un nouvel ouvrage plus profond de 30m permettrait d'assurer un débit pour l'AEP de 100 l/s (soit 200 l/s en période de pointe) pour les cycles hydrologiques déficitaires de probabilité d'occurrence atteignant « 30 ans sec ». Les deux scénarios suivants seraient satisfaits :
 - (i) $Q_r=200$ l/s et $Q_{bAEP}=100$ l/s et
 - (ii) $Q_r=250$ l/s et $Q_{bAEP}=100$ l/s.Le volume annuel pompé serait compris entre 5 et 5.5 millions de m^3 . La durée de sollicitation du système karstique serait de 63, respectivement 65 jours.

7. Interprétation du suivi hydrobiologique de la faune stygobie réalisé sur le système karstique des Cent Fonts

Une synthèse du rapport « Interprétation du suivi hydrobiologique de la faune stygobie réalisé sur le système karstique des Cent Fonts lors du pompage d'essai » rédigé par Olivier M-J., Martin D., Bou C., Prié V., avec la participation de D. Galassi & P. Marmonier, septembre 2006) a été effectuée. Pour plus de détails, le lecteur se référera au rapport coordonné par l'équipe d'Hydrobiologie et Ecologie Souterraines (UMR CNRS 5023 Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux) de l'Université Claude Bernard, Lyon I (Annexe 8).

7.1. INTRODUCTION

La faune du système karstique des Cent Fonts a déjà fait l'objet d'un travail de recherche en 1968 par le CNRS de Moulis en Ariège (Rouch et al., 1968) ; Le système a été étudié en conditions naturelles au niveau de l'ensemble des griffons, des regards et de la grotte pour les périodes de novembre 1967 à février 1968 et de mai et juillet 1968.

Ce site est aujourd'hui inclus dans le périmètre d'une Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) de type I (910009549 « Les Cent Fonts ») ; le bassin versant de l'Hérault est partiellement recouvert par une ZNIEFF de type II (9100009548 « Gorges de l'Hérault et du Lamalou »), qui mentionnent notamment la richesse exceptionnelle du site en crustacés souterrains et la présence outre du décapode *Troglocaris inermis*, de l'Amphipode *Ingolfiella* cf. *thibaudi*, et des Isopodes *Stenasellus buili*, *Proasellus cavaticus* et *Sphaeromides raymondi* (Botosaneanu, 1998).

Ce site fait également l'objet d'une proposition de site d'intérêt communautaire (futur site Natura 2000), le site FR 9101388 « Gorges de l'Hérault », intégrant la Zone de Protection Spéciale pour les oiseaux FR 9112004 « Hautes Garrigues du Montpelliérais ».

Dans ce contexte de labellisation et de reconnaissance officielle de la qualité du site, le projet d'exploitation des ressources en eaux souterraines du système karstique des Cent Fonts a fait l'objet d'une première étude d'impact (TERCIA, Acer campestre, 2001) liée aux travaux de forage et d'installation du matériel de pompage. Le projet d'essais de pompage devait donc, au même titre, faire l'objet d'un suivi biologique mais portant cette fois-ci sur la faune vivant à l'intérieur du massif, dans les eaux souterraines sollicitées par pompage.

Comme la plupart des aquifères, le système karstique des Cent Fonts est colonisé par un assemblage hétérogène d'espèces aquatiques, de caractéristiques biologiques et écologiques très diverses (Rouch, 1982) : (i) les unes vivent exclusivement dans les

eaux de surface ; leur présence dans l'aquifère indique une intrusion, fonctionnelle ou dysfonctionnelle, des eaux de surface dans le milieu souterrain (Rouch, 1977) ; (ii) les autres résident dans l'aquifère sur un plus long terme et partagent leur cycle vital entre les eaux de surface et les eaux souterraines, certaines étant capables de développer des populations durables dans chacun des deux milieux (Gibert et al., 1994) ; (iii) une dernière catégorie renferme des espèces vivant exclusivement dans les eaux souterraines. Elles sont qualifiées de stygobies, par référence au Styx, le fleuve des ténèbres. Ce sont ces dernières espèces, très particulières par rapport à leurs homologues des eaux de surface, qui ont fait l'objet d'un suivi biologique accompagnant les pompages d'essais effectués en été 2005 sur le système karstique des Cent Fonts.

7.2. EFFETS D'UN POMPAGE SUR LES COMMUNAUTES STYGOBIONTES

Au préalable, il est nécessaire de rappeler qu'il existe peu de données biologiques disponibles sur des systèmes sollicités par pompage sur du long terme, fournissant des éléments comparatifs.

Les dommages possibles, occasionnés par un pompage de l'eau souterraine sur les communautés stygobiontes, ont été recensés selon trois origines distinctes :

- (1) l'extraction directe d'animaux : un entraînement prévisible des organismes dans les turbines des pompes et leur éjection à l'extérieur du massif a été pris en compte. La survie des organismes stygobiontes rejetés dans les eaux de surface est impossible. Si le taux d'extraction est trop important et dépasse un seuil limite, les populations encourent un risque d'extinction. Le seuil limite d'extraction acceptable pourrait raisonnablement correspondre à celui qui est observé lors des éjections naturelles qui se produisent régulièrement en période de crue (connues sous le nom de «dérive» ou «drift» ou d'«hémorragie», terme utilisé pour les systèmes karstiques par Rouch) et qui entrent dans un processus normal de fonctionnement de l'écosystème karstique. L'«hémorragie» naturelle d'organismes lors de crues moyennes n'affecte généralement pas les populations des karsts (Rouch, 1980, Gibert, 1986). La quantification directe de cet entraînement passif a été réalisée lors des essais de pompages sur les eaux d'exhaure.
- des modifications internes, liées à l'abaissement rapide et conséquent du niveau piézométrique, devant entraîner :
- (2) une exondation prolongée d'une partie du massif, face à laquelle très peu d'espèces disposent de stratégies de résistance. Cet effet est partiellement contrôlé par l'inventaire post-pompage présenté dans cette étude, mais l'évaluation ne sera complète qu'à partir d'un suivi à plus long terme.
- (3) une intrusion d'eau de surface par le lit de l'Hérault due à une faille située au droit des sources, dont l'intensité a été évaluée par l'étude hydrogéologique (cf. rapport BRGM RP-54426-FR, chapitre 5, paragraphe 5.4.2). Cette eau est

susceptible de véhiculer des organismes et des bactéries de surface, de la matière organique, des nutriments et polluants divers au sein du conduit karstique, voire dans la zone autour du drain sous influence du pompage. Cette intrusion peut modifier le fonctionnement biologique du système. La dynamique d'apparition d'invertébrés exogènes (stygoxènes) est présentée dans ce rapport, mais les effets de ces intrusions (si elles deviennent chroniques) sur le fonctionnement de l'écosystème à plus long terme, n'a pas été pris en compte dans le protocole de suivi mis en œuvre.

Enfin la conjonction des trois phénomènes peut accentuer la vulnérabilité de l'écosystème sur le long terme.

7.3. CARACTERISTIQUES DES ESPECES STYGOBIES

Les organismes stygobies sont des espèces originales. Elles ont développé, au cours d'une longue évolution (généralement plusieurs dizaines de millions d'années), des caractéristiques biologiques et des capacités physiologiques qui répondent aux contraintes que leur impose le milieu souterrain : absence de lumière, réduction d'oxygène, oligotrophie.

Outre la disparition des organes visuels, s'accompagnant du développement de structures sensorielles compensatoires, les organismes stygobies sont caractérisés par un métabolisme très bas et, en conséquence, par des cycles de reproduction extrêmement longs et « dilatés » dans le temps par comparaison avec les organismes de surface. Les stygobies ont opté pour une durée de vie longue (jusqu'à 30 ans chez l'Amphipode *Niphargus*, contre seulement 2 ans chez le *Gammarus*, Amphipode des eaux de surface), mais aussi sur la production d'un faible nombre de descendants (jusqu'à 1 seul oeuf par ponte chez les Syncarides, Coineau, 1998), avec une énergie consacrée à une protection souvent plus importante des jeunes. Les stratégies de vie des stygobies sont ainsi basées sur une relative constance du milieu souterrain. Du fait de ces traits biologiques, l'abondance des espèces stygobiontes demeure faible. Rapportée au volume de l'aquifère, la densité des populations est même extrêmement basse, même si localement on peut récolter, à proximité des flux de nourriture ou à l'interface avec les milieux de surface, des individus en très grand nombre et même parfois, pour certaines espèces (*ex.*, *Niphargus virei*), des formes de pullulement.

Comme toute autre espèce, chacune des formes stygobies est caractérisée par une aire de distribution qui lui est propre et en dehors de laquelle elle est absente. Cette aire de distribution est contrôlée par la valence écologique de l'espèce (ensemble des caractéristiques environnementales en adéquation avec son développement) et par ses capacités de dispersion. Les capacités de dispersion sont elles-mêmes liées à la biologie de l'espèce (fécondité), à sa mobilité (propagation active) ou à une propagation passive, comme la dispersion d'amont en aval d'une rivière par l'écoulement du flux d'eau, ou les phénomènes de phorésie (processus par lequel un invertébré s'attache à un organisme pour émigrer d'un site à un autre). La mobilité des organismes souterrains est très variable d'un groupe systématique à l'autre. Ainsi, chez les macro-crustacés, de nombreuses formes sont pratiquement aussi mobiles que leurs homologues de surface (Isopodes, Amphipodes), mais les capacités de

dispersion passives sont très réduites par rapport à ce que l'on observe en surface, en raison de la forte fragmentation qui caractérise les réseaux souterrains, notamment au niveau des conduits karstiques. Cette faible connectivité se traduit par un compartimentage et un isolement de différentes populations d'une même espèce. Puis, au fil du temps, par des phénomènes de spéciation, elle aboutit à la formation d'espèces distinctes et à distribution géographique très étroite (espèces endémiques). L'environnement souterrain est celui qui comporte le plus fort taux d'endémisme au monde (Gibert & Deharveng, 2002). En France, plus de 70% des espèces sont endémiques de France (Ferreira *et al.* sous presse) et la proportion d'endémiques *stricts* (espèces présentes sur un seul site) est maximale dans les régions méridionales (Dole-Olivier *et al.*, 2005).

Les modifications anthropiques de l'environnement souterrain constituent une pression supplémentaire que les espèces doivent affronter et qui s'applique suivant une chronologie et une vitesse en dysharmonie avec leurs capacités biologiques. La conjonction des caractéristiques de ces populations avec une anthropisation confère à ces communautés, *a priori* fragiles, une vulnérabilité indéniable. Ces caractéristiques écologiques ont des implications très fortes en termes de gestion du patrimoine biologique : la plupart des stygobies sont des espèces vulnérables et à distribution géographique très réduite, le phénomène étant accentué dans les régions méridionales et périméditerranéennes.

7.4. PROTOCOLE DE SUIVI ET METHODOLOGIE DES PRELEVEMENTS ET DES INVENTAIRES

Le protocole de suivi de la faune stygobie comprend quatre phases principales avec un inventaire de la faune des sources et des cavités pénétrables et un inventaire de la faune hyporhéique de l'Hérault (organismes colonisant le sous-écoulement des cours d'eau) :

1. Un inventaire faunistique du massif avant pompage a été réalisé les 18 et 19 juillet 2005 (étiage sévère). L'échantillonnage de la zone hyporhéique de l'Hérault a été effectué le 19 Juillet alors que le cours d'eau était en étiage. Cette période est normalement très propice à la récolte des espèces stygobies vivant dans la zone hyporhéique (Marmonier et Dole, 1986, Dole-Olivier et Marmonier, 1992).
2. Une évaluation qualitative et quantitative de la faune extraite du massif a été réalisée en parallèle avec le protocole de pompage proposé par le BRGM du 27-07 au 30/09/2005 (Tableau 21 et Tableau 22) :
 - 1 échantillon lors de chaque essai par palier (soit un à 200 l/s, un à 300 l/s, un à 500 l/s et un à 400 l/s). Les prélèvements sont collectés par sous-échantillonnage d'un débit de 4-5 l/s ;
 - filtrage pratiquement ininterrompu des eaux issues du pompage en continu de 400 l/s. Lors de ces pompages, deux types d'échantillons ont été réalisés simultanément, l'un filtrant un débit de sous-échantillonnage de 4 l/s et le second filtrant un débit de sous-échantillonnage de 60 l/s. Une interruption dans ce protocole de filtrage est à noter du 1er au 4

août en raison d'un acte de vandalisme qui a provoqué la mise à sec des filets.

3. Un inventaire faunistique du massif après pompage a été réalisé les 1er et 2 décembre 2005 pour ce qui concerne la cavité et les sources. Le débit de l'Hérault à cette période, bien que proche de celui de l'étiage, n'a pas permis un échantillonnage de la faune hyporhéique, la vitesse du courant et la hauteur d'eau ne laissant pas un libre accès à l'intérieur du chenal.
4. Un suivi de crue postérieur aux essais de pompage ; celui-ci s'est déroulé du 20 au 28 janvier 2006 après un fort épisode neigeux. Il avait été proposé de ne pas échantillonner trop rapidement à la suite des essais de pompage et des crues de septembre et octobre, afin de respecter un temps de résilience probable des communautés après les perturbations liées aux essais de pompage. Ces chutes de neige ont provoqué une crue de moyenne amplitude. L'échantillonnage est constitué de cinq prélèvements (filtrages en continu) de l'exutoire principal (station de jaugeage du BRGM). Il est intervenu plusieurs jours après la première montée des eaux dans le karst, ce qui ne correspond pas à une chronologie optimale pour un suivi de crue.

C'est donc un total de 42 échantillons qui a été réalisé pour ce suivi dans lequel 35 prélèvements ont été examinés et traités.

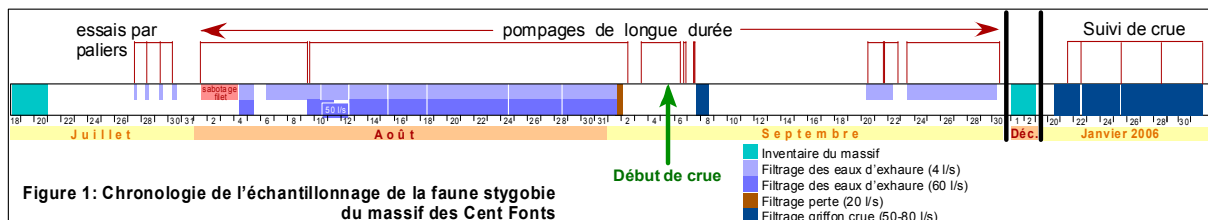
Plusieurs techniques ont été mises en œuvre simultanément en vue de réaliser les inventaires de la faune au niveau des sources, des cavités pénétrables et de l'Hérault. Les techniques de pompages «Bou-Rouch», le filet «surber», et les filtrages ont été utilisés dans les sources; celles des appâts (balances), de la chasse à vue, du filet «surber» et des pompages «Bou-Rouch» dans les cavités pénétrables. Les échantillons ont été regroupés par type de technique pour constituer un seul échantillon. L'échantillonnage de la zone hyporhéique de l'Hérault est réalisé par pompage « Bou-Rouch » après insertion d'un tube crépiné à 50 cm sous la surface des sédiments et filtrage de l'eau aspirée. Pour le filtrage des eaux d'exhaure, deux dérivations ont été mises en place sur l'une des trois conduites, l'une permettant de filtrer un débit de 4 l/s et la seconde un débit de 60 l/s. Les filets utilisés ont une taille de maille qui varie entre 100 et 150 μm . Les eaux d'exhaure n'étant pas turbides, aucun colmatage des filets n'a été constaté en cours d'échantillonnage.

La détermination taxonomique des échantillons a été effectuée après classement des organismes présents par groupe taxonomique, sous microscope stéréoscopique. Le tri entre faune stygobie et non stygobie a été réalisé. La détermination à l'espèce a été effectuée pour les organismes stygobies ainsi que pour d'autres groupes ne présentant pas de stygomorphie évidente tels que les crustacés Cyclopoides, Harpacticoides, Ostracodes ainsi que les Mollusques. Pour les groupes non-stygobies ne présentant pas d'intérêt pour l'étude, le dénombrement n'a pas été effectué ; leur abondance a été évaluée de manière qualitative selon 4 classes.

Tableau 21 - Suivi de l'impact du pompage sur les communautés de la faune cavernicole des Cent Fonts : protocole conventionnel avec le BRGM et le CG34

QUESTION	Inventaire faunistique du massif (filet surber)		Evaluation de la dérive faunistique	vérification des stocks
REPONSE	Inventaire sources	Inventaire grotte	filtrages d'eau de pompage	Filtrages source en crue
AVANT pompage	3	1		
PENDANT période de pompage			4+6	
APRES pompage	3	1		2
nombre d'échantillons	6	2	10	2
			TOTAL:	20 échantillons

Tableau 22 - Chronologie de l'échantillonnage de la faune stygobie du massif des Cent Fonts



7.5. RESULTATS

7.5.1. Inventaire général des espèces stygobies récoltées aux Cent Fonts

Un total de 36 espèces stygobies a été recensé dans les 35 échantillons analysés lors de cette campagne 2005-2006. Cette valeur, qui peut sembler *a priori* faible dans un système autotrophe, est en fait particulièrement élevée dans le cas d'un système souterrain (Danielopol & Pospisil, 2001). Bien que les connaissances sur la biodiversité souterraine à l'échelle mondiale soient hétérogènes, le système des Cent Fonts figure parmi les 20 aquifères les plus riches (Culver & Sket (2000)).

Une comparaison de ces données récentes avec des synthèses antérieures tirées de la base de données du laboratoire d'HydroBiologie et d'Ecologie Souterraines de l'Université de Lyon (HBES) est présentée dans le Tableau 23. On soulignera :

- d'une part, que 6 des espèces préalablement recensées dans les études passées n'ont pas été capturées, parmi lesquelles des crustacés de grande taille, tels l'isopode *Sphaeromides raymondi*, (endémique de la région nord-montpelliéraine et de l'Ardèche) et des formes de plus petite taille comme l'ostracode *Sphaeromicola cebennica juberthiei*, et le cyclopoïde *Graeteriella (Paragraeteriella) vandeli*, tous deux endémiques stricts (*in* Ferreira, 2005) ;
- d'autre part, près de 20 espèces nouvelles pour le site ont été identifiées, appartenant surtout au groupe des Amphipodes, des Ostracodes et des Mollusques. Cette forte augmentation du nombre d'espèces répertoriés est liée au fait que, lors

des prospections effectuées par Rouch et al. (1968), l'accent avait été mis sur les espèces de grande taille et sur les copépodes ;

- enfin, il est important de noter que 3 espèces de Mollusques sont dites «nouvelles pour la science» (notées n. sp. càd, *novae species*, description en cours) et que 4 espèces, 2 Amphipodes (*Niphargus gallicus* et *Niphargus kochianus kochianus*) et 2 Ostracodes (*Pseudocandona zschokkei* et une *Candoninae* triangulaire), n'ont pas été récoltées directement dans le massif karstique mais dans la zone hyporhéique de l'Hérault en connexion avec le karst.

En conclusion ce premier inventaire porterait à 44 le nombre total d'espèces recensées, c'est-à-dire potentiellement présentes sur le site.

Tableau 23 - Inventaire général des stygobies du système karstique des Cent Fonts.
Comparaison avec les données antérieures disponibles.

Groupe	genre / espèce	nom d'auteur	inventaire bibliographique*	récoltes 2005-2006
HIRUDINEA	<i>Trocheta bykowskii</i>	Gedroy, 1913	X	
MOLLUSCA	<i>Bythinella n. sp.</i>	à décrire		X
GASTROPODA	<i>Bythiospeum bourguignati</i>	Paladilhe, 1866		X
	<i>Heraultiella exilis</i>	Paladilhe, 1867		X
	<i>Islamia moquiniana</i>	Dupuy, 1851		X
	<i>Moitessieria rollandiana</i>	Bourguignat, 1863		X
	<i>Moitessieria simoniana</i> **	Saint-Simon (1848)	X	X
	<i>Moitessieria n.sp.1</i>	à décrire		X
	<i>Moitessieria n.sp.2</i>	à décrire		X
	<i>Paladilhia pleurotoma</i>	Bourguignat 1865		X
DECAPODA	<i>Troglocaris inermis</i>	Fage, 1937	X	X
ISOPODA	<i>Stenasellus buili</i>	Remy, 1949	X	X
	<i>Proasellus cavaticus</i>	Leydig, 1871	X	X
	<i>Microcharon doueti</i>	Coineau, 1968	X	X
	<i>Faucheria faucheri</i>	Dollfus & Viré, 1900	X	X
	<i>Sphaeromides raymondi</i>	Dollfus, 1897	X	
AMPHIPODA	<i>Niphargus laisi</i>	Schellenberg, 1936		X
	<i>Niphargus gallicus</i>	Schellenberg 1935		X
	<i>Niphargus kochianus kochianus</i>	Bate 1859		X
	<i>Niphargus pachypus</i>	Schellenberg 1933		X
	<i>Niphargus virei</i>	Chevreaux, 1896	X	X
	<i>Salentinella angelieri</i>	Ruffo & Delamare-Deboutteville, 1952		X
	<i>Salentinella delamarei</i>	Coineau, 1962		X
	<i>Salentinella sp.</i>		X	
	<i>Ingolfiella sp.</i> ***		X	X
	<i>Ingolfiella thibaudi</i>	Coineau, 1968		
OSTRACODA	<i>Fabaeformiscandona cf. breuili</i>	Paris, 1920		X
	<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>	Danielopol, 1978		X
	<i>Cryptocandona sp ?</i>			X
	<i>Pseudocandona zschokkei</i>	Wolf (1920)		X
	<i>Pseudocandona sp ?</i>			X
	<i>Candoninae triangulaire</i>			X
	<i>Sphaeromicola cebennica juberthiei</i>	Danielopol, 1977	X	
SYNCARIDA	<i>Clamourella cf. delayi</i>	Serban, Coineau & Delamare, 1971	X	X
CYCLOPOIDEA	<i>Acanthocyclops rhenanus</i>	Kiefer, 1936	X	
	<i>Acanthocyclops venustus westfalicus</i>	(Kiefer, 1931)	X	X
	<i>Graeteriella (Paragraeteriella) vandeli</i>	Lescher-Moutoué, 1969	X	
	<i>Graeteriella (Graeteriella) unisetigera</i>	Graeter, 1910	X	
	<i>Graeteriella (Graeteriella) cf. boui</i>	Lescher-Moutoué, 1974	X	X
	<i>Kieferiella delamarei</i>	Lescher-Moutoué, 1976	X	X
	<i>Speocyclops racovitzai</i>	Chappuis, 1923	X	
HARPACTICOIDA	<i>Pseudectinosoma vandeli</i>	Rouch, 1969	X	X
	<i>Ceuthonectes gallicus</i>	Chappuis, 1928	X	X
	<i>Elaphoidella leruthi meridionalis</i>	Chappuis, 1953	X	X
	<i>Nitocrella omega</i>	Hertzog, 1936		X
	<i>Nitocrella hirta hirta</i>	Chappuis, 1923	X	X
NOMBRE TOTAL D'ESPECES			24	36

*liste modifiée d'après Rouch et al., 1968; Lescher-Moutoué, 1976; Malard et al., 1997 & Base de données HBES

**identification soumise à caution: correspondrait en fait à *Moitessieria n.sp.1*

*** vraisemblablement *Ingolfiella thibaudi*

7.5.2. Faune extraite lors des pompages

Les données faunistiques ont été subdivisées en deux groupes, les stygobies d'une part, les non-stygobies d'autre part. Le nombre cumulé d'individus extraits est calculé séparément pour les essais par paliers et pour les pompages en continu et ce pour chacune des deux catégories d'organismes. Dans chaque cas la densité de dérive (nombre d'individus éjectés /m³) ont été calculés pour chaque échantillon.

STYGOBIES

Lors des pompages par paliers, le nombre de stygobies récoltés est faible (au total 6 individus, dont 2 *Pseudectinosoma vandeli*, endémiques du massif, et 1 *Troglocaris inermis*). Ajustée au débit réel (le débit filtré est en moyenne 100 fois plus faible que le débit réel), cette valeur devient plus conséquente (600 individus à la fin des 4 essais, soit 24 heures de pompage).

Le nombre de stygobies collectés à la fin des pompages en continu est de 876 individus. La pompe aspire majoritairement des copépodes (*Graeteriella* cf. *boui*, *Ceuthonectes gallicus*, *Pseudectinosoma vandeli*), l'Ostracode *Schellencandona* cf. *simillilampadis* et, plus rarement, *Troglocaris inermis* (échantillons à 60 l/s) et *Niphargus virei*. Rapporté au débit réel, la dérive artificielle des stygobies atteint un total de quelques 90 000 individus dont plus de 25% appartiennent à l'espèce endémique des Cent Fonts *Pseudectinosoma vandeli*. Les stygobies qui apparaissent en majorité sont de taille inférieure aux stygobies de plus grande taille tels que *Troglocaris inermis* et *Niphargus virei*.

NON-STYGOBIES

Le niveau de détermination étant hétérogène d'un groupe taxonomique à l'autre, le groupe des non-stygobies rassemble, sans distinction, les deux catégories écologiques restantes, les stygophiles (résidents occasionnels) et les stygoxènes (hôtes accidentels, indicateurs d'une intrusion d'eau de surface). Cependant certains groupes très abondants, comme les Crustacés Cladocères, sont entièrement stygoxènes.

Lors des pompages par paliers de débit, les éléments exogènes apparaissent en très faible nombre, mais cette apparition est très rapide, comme en témoigne la présence du genre *Gammarus* lors du 2ème essai (300 l/s), soit 4 heures après de début de l'expérimentation. Ajusté au débit réel, le nombre de stygoxènes récoltés représente 1500 individus pour 24 heures, soit plus du double des stygobies. Au cours des pompages en continu, la densité de dérive varie de 0.14 à 6.1 individus/m³. Elle ne se stabilise pas au cours du temps. Ces densités de dérive ne seront pas discutées plus en détail car les calculs présentés ne tiennent pas compte des nombreuses larves d'insectes qui pénètrent dans le massif par le lit de l'Hérault et qui sont collectées par la pompe. A la fin des opérations de pompage en continu, les pompes ont évacué plus de trois millions d'épiges (larves d'insectes non comprises). Les larves d'insectes récoltées appartiennent aux groupes des Hétéroptères, Trichoptères, Ephéméroptères, Diptères Chironomidae et Odonates.

Outre l'aspect quantitatif de cette contamination, on notera la présence singulière de nombreuses formes n'appartenant pas aux communautés benthiques¹⁰ telles que les larves d'*Atyaephyra desmaresti* (Crustacé décapode), les larves d'*Argulus* (copepode parasite de poissons) ou des formes plus spécifiques des milieux stagnants tels que les copépodes *Moraria pectinata* et *Thermocyclops crassus*.

La présence de ce type de faune dans les eaux d'exhaure indique que la contamination par le lit de l'Hérault est très rapide et se réalise par infiltration directe de la lame d'eau de surface sans aucune filtration préalable à travers les sédiments de la zone hyporhéique.

Si les nombreux filtrages effectués par Rouch *et al.* (1968) mentionnent la présence d'espèces non-stygobies (épigées¹¹ notamment chez les copépodes), ils ne signalent ni faune planctonique, ni larves d'insectes qui pourraient attester de l'influence d'une source faunistique exogène régulière, telles que les pertes la Buèges dont le transit à travers le karst est long (10 km environ).

7.5.3. Inventaire comparatif PRE / POST pompage

L'inventaire effectué avant et après les pompages, concerne d'une part un inventaire au niveau des sources et de la cavité avant pompage et d'autre part, un inventaire après pompage au niveau de ces mêmes points et un suivi de crue post-pompage.

a) Inventaire au niveau des sources et de la cavité avant et après pompage

Remarque: Il a été difficile, dans le cadre de ce contrat, établi sur une durée limitée, de sélectionner des périodes d'échantillonnage *similaires* pour comparer les deux inventaires pré et post-pompage. Ainsi, sources et cavité ont été échantillonnées dans des conditions hydrologiques qui ne sont pas comparables, la période antérieure aux pompages correspondant à un étiage prononcé (fréquence de retour: 30 ans environ) et la période post-pompage étant plus favorable à la collecte des stygobies.

L'ensemble des espèces récoltées au cours de ces campagnes d'échantillonnage ne se retrouve pas en totalité dans l'inventaire des sources et de la cavité (34 espèces dans l'inventaire sur un total de 43), soulignant le rôle complémentaire des suivis de crue. Les résultats apportés par l'échantillonnage de la faune hyporhéique montrent que de nombreuses espèces sont communes au massif proprement dit et au milieu souterrain poreux qui accompagne le cours d'eau, traduisant de très fortes connections entre les deux sous-systèmes. Ils soulignent également l'importance de la zone hyporhéique et des systèmes poreux de fond de vallée pour l'estimation de la biodiversité stygobie. Ce résultat est conforme aux études récentes menées dans

¹⁰ Communauté vivant sur le fond des cours d'eau

¹¹ Espèce caractéristique des eaux de surface

divers pays européens pour l'évaluation de la biodiversité des communautés stygobies en région karstique (Programme de recherches PASCALIS, Gibert, 2001).

La comparaison des récoltes pré et post-pompage (Tableau 24) montre un plus grand nombre d'espèces collectées après l'expérimentation. Ce premier constat souligne l'influence forte de la saisonnalité et du débit (étiage exceptionnel) sur les inventaires, le pompage ne pouvant aucunement justifier cet enrichissement. Quatre espèces seulement, récoltées avant le pompage, n'ont pas été retrouvées lors du second inventaire: *Moitessieria* n. sp. 1, *Stenasellus buili*, *Salentinella delamarei* et *Proasellus cavaticus*; les deux dernières espèces n'étant pas des formes endémiques. D'autre part *Moitessieria* n. sp. 1 a été récoltée plus tard, lors du suivi de crue de janvier 2006. La forte abondance relative des crustacés *Niphargus virei* et *Faucheria faucheri*, provient des échantillonnages avec appâts (balances) dans la cavité.

Tableau 24 - Comparaison des inventaires effectués avant et après les pompes expérimentaux au niveau des sources et de la cavité des Cent Fonts (données cumulées de tous les échantillons récoltés, présentées en abondance et en abondance relative)

Identification / protocole		inventaire massif					
		Abondance dans les échantillons			abondance relative		
		Hyporhéique	Massif		Hyporhéique	Massif	
			AVANT	APRES		AVANT	APRES
MOLLUSQUES	GASTROPODA <i>Moitessieria rolandiana</i>		14	26		12,17	8,07
	<i>Moitessieria</i> n. sp. 1		1			0,87	
	<i>Moitessieria</i> n. sp. 2		1			0,87	
	<i>Bythinella</i> n. sp.		51	71		44,35	22,05
	<i>Heraultiella exilis</i>		2	1		1,74	0,31
	<i>Bythiospeum bourguignati</i>	1		4	1,02		1,24
	<i>Islamia moquiniana</i>			10			3,11
	<i>Paladilhia pleurotoma</i>		1				
CRUSTACÉS	<i>Acanthocyclops venustus westfalicus</i>	21		7	21,43		2,17
	CYCLOPOIDA <i>Graeteriella cf. boui</i>	4	4	18	4,08	3,48	5,59
	HARPACTICOIDA <i>Ceuthonectes gallicus</i>			6			1,86
	<i>Elaphoidella leruthi</i>			23			7,14
	<i>Nitocrella omega</i>			2			0,62
	<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>			3			0,93
	<i>Fabaeformiscandona cf. breuili</i>			4			1,24
	OSTRACODA <i>Cryptocandona sp</i>			5			1,55
	<i>Pseudocandona zschokkei</i>	9			9,18		
	<i>Pseudocandona sp</i>			4			1,24
	<i>Candoninae triangulaire</i>	27			27,55		
	AMPHIPODA <i>Niphargus virei</i>		20	63		17,39	19,57
	<i>Niphargus laisi</i>			1			0,31
	<i>Niphargus gallicus</i>	1			1,02		
	<i>Niphargus pachypus</i>	2		2	2,04		0,62
	<i>Niphargus kochianus kochianus</i>	2			2,04		
	<i>Niphargus</i> (juvéniles indét.)	18	1	7	18,37	0,87	2,17
	<i>Salentinella delamarei</i>		2			1,74	
	<i>Salentinella indét.</i>			2			0,62
	<i>Ingolfiella thibaudi</i>	3		1	3,06		0,31
	ISOPODA <i>Proasellus cavaticus</i>		2			1,74	
	<i>Stenasellus buili</i>	1	1		1,02	0,87	
	<i>Faucheria faucheri</i>		15	53		13,04	16,46
	<i>Microcharon doueti</i>	9		9	9,18		2,80
abondance totale		98	115	322	100%	100%	100%
Richesse spécifique		12	13	22			

b) Suivi de crue post-pompage au niveau de la source

Le suivi de crue a respecté un délai minimum de retour à l'équilibre du massif après les pompages et les crues d'automne (Tableau 25). Idéalement, le meilleur moment pour collecter la faune dérivante se situe lors de la phase montante de la courbe de débit à l'exutoire, c'est-à-dire lorsque les premières eaux de «lessivage» ont traversé le massif. C'est en général à cette période que le maximum de dérive est observé (Gibert, 1986) et que l'on obtient une image plus exhaustive du contenu du massif. Il est cependant difficile d'être présent pour échantillonner au moment opportun, d'une part la survenue et le caractère significatif de la crue étant difficilement prévisibles; d'autre part le temps de réaction aux exutoires après les précipitations étant variable d'un massif à l'autre. Ainsi, le suivi de la crue de janvier 2006 a débuté après le maximum d'amplitude, tel que décrit par la cote piézométrique à l'exutoire.

Le suivi de crue a permis de récolter 15 espèces, soit 4 de plus que lors de l'échantillonnage des sources et de la cavité. Le nombre d'espèces récoltées en période post-pompage s'élève donc à 24 sur un total de 44 espèces recensées. On a donc retrouvé un peu plus de la moitié des espèces recensées. L'obtention de données quantitatives (densités de dérive) n'a pas été possible car les débits filtrés lors de la crue n'ont pas pu être enregistrés.

Tableau 25 - Inventaire post-pompage du suivi de crue (janvier 2006) comparé à l'inventaire post-pompage du massif (décembre 2005)

	Inventaire post-pompages	SOURCES & CAVITE	CRUE
MOLLUSQUES	GASTROPODA <i>Moitessieria rolandiana</i>	26	8
	<i>Moitessieria n. sp. 1</i>		
	<i>Bythinella n. sp.</i>	71	
	<i>Heraultiella exilis</i>	1	
	<i>Bythiospeum bourguignati</i>	4	
	<i>Islamia moquiniana</i>	10	9
CRUSTACES	<i>Kieferella delamarei</i>		131
	<i>Acanthocyclops venustus westfalicus</i>	7	326
	CYCLOPOIDA <i>Graeteriella cf. boui</i>	18	193
	HARPACTICOIDA <i>Ceuthonectes gallicus</i>	6	
	<i>Elaphoidella leruthi</i>	23	
	<i>Nitocrella omega</i>	2	1
	<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>	3	71
	<i>Fabaeformiscandona cf. breuili</i>	4	
	OSTRACODA <i>Cryptocandona sp.</i>	5	
	<i>Pseudocandona sp.</i>	4	38
	<i>Mixtacandona sp.</i>		1
	AMPHIPODA <i>Niphargus virei</i>	63	75
	<i>Niphargus laisi</i>	1	1
	<i>Niphargus pachypus</i>	2	
	<i>Niphargus</i> (juvéniles indét.)	7	2
	<i>Salentinella angelieri</i>		1
	<i>Salentinella indét.</i>	2	1
	<i>Ingolfiella thibaudi</i>	1	5
	ISOPODA <i>Faucheria faucheri</i>	53	20
	<i>Microcharon doueti</i>	9	8
abondance totale		322	891
Richesse spécifique		20	15
Richesse spécifique totale		24	

7.6. DISCUSSION / INTERPRETATION

7.6.1. Crue /pompage ou dérivation naturelle des organismes versus dérivation artificielle

«Dérivation » liée aux pompes

Le filtrage des eaux d'exhaure a permis d'estimer que l'aspiration d'eau par la pompe aurait extrait 87600 organismes stygobies du massif.

Ce résultat est a priori plus faible que ce qui était attendu ; il est à mettre en relation avec la position de la pompe et la faible turbidité des eaux : la pompe est placée dans le point le plus bas possible du drain karstique intercepté par le forage. Les organismes qui colonisent les eaux souterraines vivent en majorité au contact du sédiment, que ce soit à sa surface (espèces benthiques) ou à l'intérieur (espèces interstitielles et thigmotactiques) ; elles sont plus rarement planctoniques et sont donc naturellement assez rares en eau libre.

En dehors des périodes de crue, les massifs karstiques expulsent en continu et de manière naturelle de la faune stygobie. Cette dérivation chronique a été mesurée par Rouch et al. (1968), sur le massif des Cent Fonts, pour un débit total des sources estimé à 300 à 450 litres/s, lors des mois de mai et juillet 1968. Tous les griffons étant pris en compte, les auteurs évaluent de 600 à 1000 individus/jour le nombre d'organismes extraits de manière naturelle du karst. Dans le cas du pompage expérimental, si l'on arrondit à 47 jours la durée des filtrages, le nombre de stygobies expulsés par la pompe serait d'environ 1900 individus par jour, soit près de deux fois plus que l'évaluation en conditions standard.

On sait également que l'expulsion des stygobies augmente naturellement lors des épisodes de hautes eaux. Les valeurs de densité de dérivation calculées lors des pompes pourraient être comparées avec une dérivation naturelle de la faune en période de crue et pourraient être assimilées à une période de perturbation hydrologique. La bibliographie offre peu de points de comparaison directe avec la faune extraite naturellement au cours des crues et la dérivation liée à un effet anthropique tel qu'un pompage. Ainsi pour une série de 30 crues suivies sur le système du Baget, Rouch et al., (1993) ont obtenu, pour les Harpacticides, des densités variant entre 0.55 et 4,01 individus/m³, ce qui correspond sur l'ensemble de la communauté stygobie, à des valeurs variant entre 0.484 et 3.52 ind./m³. Le système subissant environ 10 à 20 crues sur un cycle annuel, plusieurs millions d'individus sont ainsi perdus chaque année. Les crues sont cependant, contrairement aux pompes, des événements de courte durée. Il faut également ajouter, que les crues sont des événements qui affectent la totalité du système karstique avec des vitesses et des volumes d'eau en jeu plus importants que lors d'un pompage.

7.6.2. Contamination par les eaux de surface

L'apparition, très tôt dans le processus de pompage, d'éléments de la faune de surface, à la fois diversifiés et abondants, révèle de manière certaine une contamination rapide par les eaux de surface. Si cette contamination peut avoir un impact facilement maîtrisable sur la qualité de l'eau de consommation (traitement, filtrage) elle entraînera néanmoins dans une partie localisée du massif (au sein du conduit karstique et dans son environnement immédiat), hormis des organismes, des bactéries, de la matière organique et des nutriments qui seront susceptibles de modifier l'équilibre biologique de l'écosystème. Cette contamination serait localisée entre le point d'entrée des eaux de surface et le point de pompage. Les effets écologiques de cette contamination ne sont néanmoins pas mesurables sur le court terme.

7.6.3. Exondation du massif

Les pompages peuvent également provoquer un autre type d'impact, non mesurable de manière directe, correspondant, lors du rabattement du niveau piézométrique, à l'exondation des sédiments meubles concernés par la zone d'influence du pompage. La dépression piézométrique provoquée par le pompage est d'une extension locale (elle est plus importante au niveau longitudinal du drain karstique majeur et plus réduite au niveau latéral, comme l'attestent les suivis piézométriques au sein du bassin d'alimentation). Il n'est actuellement pas possible de statuer définitivement sur la survie de la faune dans de telles conditions d'exondation et sur une durée aussi longue. On sait que certaines espèces comme *Niphargus virei* sont capables de construire des terriers (Ginet, 1960) dans lesquels ils s'enferment pour résister à la dessiccation, mais cet exemple est loin d'être une généralité et il n'est certainement pas applicable aux formes interstitielles (les genres *Microcharon*, *Pseudectinosoma*, *Proasellus*, *Ingolfiella*, *Clamoucella*...).

Si la structure du massif ménage des poches de survie qui se déconnectent puis se reconnectent au réseau principal lors de la remise en charge du massif, comme dans le cas du Baget, il devrait y avoir une recolonisation ultérieure. Dans le cas contraire les populations de la partie exondée du massif (partie limitée à certains secteurs à proximité du drain principal) courent un risque de disparition.

7.7. RECOMMANDATIONS, PERSPECTIVES

Les essais de pompage ont provoqué une émission d'organismes qui correspondrait au double de celle observée hors crues dans la littérature (Rouch et al., 1968). L'inventaire a permis de récolter plus d'organismes en conditions post-pompage que pré-pompage, ce qui semble indiquer qu'il n'y aurait pas d'impact notable sur les communautés stygobies. Mais les conditions hydrologiques n'étaient pas comparables et le cumul des espèces récoltées lors de l'inventaire post-pompage n'atteint que 56% des espèces potentiellement présentes. Ce résultat souligne donc aussi le fait que la connaissance du fonctionnement biologique d'un écosystème karstique, permettant raisonnablement d'en prévoir le comportement en conditions de « stress », nécessite

un échantillonnage en plus grande adéquation avec les conditions hydrologiques (notamment l'échantillonnage des crues) que celui qui a été réalisé dans le protocole de suivi des pompages. Les données fournies dans ce rapport ont une valeur ponctuelle d'expertise et n'ont pas une assise statistique suffisante pour conclure de manière certaine à un effet négligeable.

Un grand nombre d'inconnues réside encore dans le protocole d'exploitation de la ressource en eau.

Les effets de l'abaissement durable du niveau piézométrique sur les communautés stygobies n'ont pas pu être mesurés. Il n'est actuellement pas possible d'appréhender cet impact sur la base des données collectées au cours de ce suivi; de même qu'il n'est pas envisageable de planifier une évaluation directe de cet effet lors d'éventuels pompages ultérieurs et surtout d'en prévoir les conséquences en conditions d'exploitation.

Même si l'extraction d'eau et de faune par l'intermédiaire d'une pompe peut, au premier abord, s'apparenter à un processus naturel de dérive faunistique lors d'une crue, il s'agit en fait de deux mécanismes opposés. Une crue naturelle provoque un phénomène de chasse et une expulsion parfois massive d'organismes résultant d'une remontée conséquente du niveau piézométrique (Rouch, 1970; Gibert *et al.*, 1982, 1984) et du «lessivage» de l'épikarst et de la zone non saturée. Une crue évacue un volume conséquent pendant un court laps de temps provoquant une augmentation importante de la vitesse d'écoulement au niveau des drains. Les résultats bibliographiques montrent que les communautés dans leur ensemble persistent grâce à la présence dans certaines parties du massif, de refuges (systèmes annexes) à partir desquels les populations se reconstituent. Turquin (1981) a montré que les crues avaient aussi un rôle positif de redistribution des juvéniles dans le massif.

Lors d'un pompage en continu, l'extraction directe d'organismes constitue un impact qui peut rester surmontable si sa durée n'est pas excessive, comme il a été montré sur le karst du Baget (Rouch *et al.* 1993). La mesure de l'impact d'un pompage de longue durée dans le karst nécessite la mise en œuvre d'un suivi spécifique, aucune référence à ce sujet n'existant dans la littérature spécialisée.

La distinction majeure d'un pompage de longue durée avec un phénomène de crue est l'abaissement durable du niveau piézométrique. Ce dernier provoque l'exondation d'une partie limitée du massif. Dans le cas du système karstique des Cent Fonts, l'abaissement du niveau piézométrique à proximité du drain principal peut avoir comme conséquence une destruction temporaire et une réduction importante de la surface et du volume des habitats nécessaires au développement normal des organismes. Ce phénomène revêt une importance particulière dans ce type d'écosystème en raison des caractéristiques particulières des communautés stygobies résumée ci-après:

- faible densité,
- cycles de développement longs,
- capacités de dispersion réduites,

- taux d'endémisme élevé.

Des suivis de crue à long terme permettraient de savoir si la structure du karst a ménagé des refuges suffisamment efficaces pour assurer la résilience des communautés et le maintien des espèces rares et endémiques qui font la richesse de ce massif.

8. Conclusions et perspectives

8.1. ETAT DE LA CONNAISSANCE DU SYSTEME KARSTIQUE DES CENT FONTS

L'état de la connaissance du système karstique des Cent Fonts sur la base des résultats des études menées antérieurement aux pompages d'essai et de l'interprétation des pompages d'essai à l'aide de deux approches de modélisation numérique et des outils hydrochimiques est synthétisé dans les paragraphes suivants.

Le système karstique des Cent Fonts est un système binaire alimenté d'une part, par les pertes de la Buèges situées à quelques 10km de l'exutoire du système et, d'autre part, par l'infiltration de la pluie efficace sur son bassin d'alimentation. La superficie totale de celui-ci est de 60 km² au total, dont 30 km² correspondant au bassin d'alimentation des pertes de la Buèges.

Le système karstique se développe dans les formations dolomitiques du Jurassique moyen (Bathonien), d'une puissance comprise entre 250 et 450 m au sein du bassin d'alimentation des Cent Fonts ; des développements de la karstification dans la formation sous-jacente de l'Aalénien-Bajocien ne peuvent pas être exclus. La structure du réseau karstique n'est reconnue que sur une longueur de quelques 250 mètres, dans sa partie aval, au niveau de l'exutoire. Les caractéristiques fonctionnelles du système suggèrent qu'il est plus karstifié au sein de sa partie amont qu'à l'aval. L'interprétation du pompage d'essai en moyennes eaux suggère aussi que les vides karstiques sont plus développés localement au voisinage de la cote de l'exutoire que plus en profondeur. Une continuité existe entre la zone des pertes de la Buèges et l'exutoire (drain karstique en charge), sans aucune indication de localisation et de géométrie du réseau.

Le volume écoulé aux Cent Fonts est de l'ordre de 33 millions de m³ par an. La contribution moyenne des pertes de la Buèges à l'écoulement des Cent Fonts est évaluée à 50 %. La ressource peut être considérée comme importante, avec un débit moyen légèrement supérieur à 1 m³/s. Les réserves sont significatives, avec une valeur estimée à 9 millions de m³ sur la base de la détermination du volume dynamique de l'aquifère à l'aide des courbes de récession de l'hydrogramme des Cent Fonts (Ladouche et al, 2002). Cette estimation du volume dynamique (9 millions de m³) est confirmée par les résultats de l'interprétation des récessions des cycles hydrologiques 2002/2003, 2003/2004 et 2004/2005 (annexe 1).

En conditions naturelles, l'essentiel du débit de la source est assuré par la zone noyée (79 %), l'écoulement rapide issu du réservoir épikarstique (21 %) étant minoritaire (Ladouche et al, 2002). En étiage sévère, le débit de la source des Cent Fonts est uniquement assuré par la vidange de la zone noyée de l'aquifère.

En conditions influencées par un pompage au niveau de l'exutoire du système karstique des Cent Fonts, le volume pompé correspond à un volume d'eau de différentes origines au sein du système karstique, à savoir la contribution naturelle du système (conduit et blocs), le déstockage du drain karstique, la sollicitation des blocs encaissants, l'alimentation par les pertes de la Buèges ainsi que l'infiltration en provenance de l'Hérault. A partir du moment où les sources tarissent, ce qui correspond à un niveau d'eau dans le drain karstique inférieur à 76 m NGF, une infiltration d'eau de l'Hérault se met en place.

Le volume d'eau total sollicité, fonction des scénarios de pompage et de débit réservé retenus et des conditions hydrologiques, peut atteindre 22% du volume annuel total pompé; ce volume correspond au volume d'eau déstocké au sein du drain et de la matrice qui l'entoure. L'évolution du rabattement au forage de pompage n'étant pas linéaire, les écoulements ne sont en effet pas limités au seul drain karstique, une contribution des « blocs » poreux et/ou fissurés environnants et/ou des systèmes annexes au drainage (SAD) se produit. La sollicitation, par l'intermédiaire du réseau de drains karstiques, d'un réservoir de type poreux et/ou fissuré, situé principalement dans les dolomies du Bathonien est également corroborée par les résultats des analyses des isotopes du strontium sur les échantillons prélevés en cours de pompage ; la signature hydrogéochimique des eaux pompées évolue vers la signature du système karstique des Cent Fonts en période d'étiage sévère (écoulement assuré essentiellement par le drainage des blocs encaissants le réseau de drains karstiques).

La sollicitation du système karstique des Cent Fonts par pompage à l'aide du dispositif actuel semble avoir un rayon d'action limité qui a été estimé à l'aide du modèle de simulation numérique développé sous Matlab/Simulink ; le rayon d'action peut atteindre quelques 340 m pour une durée de sollicitation par pompage d'environ 90 jours à un débit de 400 l/s. Cette sollicitation limitée ainsi que l'évolution du rabattement en fonction du débit, laisseraient supposer l'existence d'un milieu fissuré et/ou de systèmes annexes au drainage. Quel est le développement de ce milieu, en profondeur et/ou à l'Ouest d'un axe virtuel de drainage entre la source et les pertes de la Buèges ? Des indices de développement de karstification (paléosurfaces, évolution de la position du lit du fleuve Hérault, ...) ainsi que des données d'un forage plus profond, permettraient d'avoir des indices supplémentaires concernant la géométrie du réseau, mais sans pour autant déterminer une géométrie réelle.

8.2. IMPACTS D'UN POMPAGE SUR LA FAUNE STYGOBIE

Le suivi hydrobiologique de la faune stygobie effectué par l'UMR CNRS 5023 Ecologie de Hydrosystèmes Fluviaux de l'Université Claude Bernard, Lyon I a permis de confirmer la diversité faunistique locale, avec un total de 35 espèces stygobies recensé, dont 18 nouvelles espèces appartenant essentiellement au groupe des amphipodes, des ostracodes et des mollusques. La présence de faunes non stygobies permet de confirmer l'infiltration de l'Hérault à partir du moment où les sources tarissent. Aucune faune planctonique ou de larves d'insectes n'a été déterminée pouvant attester de l'influence d'une source faunistique exogène régulière qui proviendrait des infiltrations de la Buèges.

Le nombre d'organismes stygobies extraits du massif karstique lors du pompage en été 2005, serait près de deux fois le nombre d'individus extraits de manière naturelle du karst en période d'eaux moyennes. Cependant, en toute relativité, il est nécessaire de garder à l'esprit qu'un système karstique en conditions naturelles à l'échelle de l'ensemble des crues d'un cycle hydrologique évacue plusieurs millions d'individus par année. De plus, l'inventaire effectué a permis de collecter plus d'organismes en conditions post-pompage que pré-pompage ; ceci semble donc indiquer que le pompage n'aurait pas eu un impact notable sur les communautés stygobies.

Même si un pompage peut au premier abord, s'apparenter à un processus naturel de dérive faunistique lors d'une crue, il s'agit en fait de deux mécanismes différents. Une crue naturelle provoque un phénomène de chasse et une expulsion parfois massive d'organismes résultant d'un «lessivage» du massif et de remontée de niveaux d'eau dans les conduits karstiques. Une crue évacue un volume important et à des vitesses au niveau du drain principal plus importantes que les vitesses de l'eau provoquées par un pompage au niveau d'un drain karstique. Les communautés dans leur ensemble persistent grâce à la présence dans certaines parties du massif, de refuges à partir desquels les populations se reconstituent. Ces refuges sont situés dans le massif au niveau des systèmes annexes au drainage notamment. Un pompage en continu sur un système karstique crée de nouvelles conditions pour les stygobies ; les populations stygobies peuvent se redistribuer dans le massif en fonction de la localisation de leurs refuges par rapport au drain karstique sollicité. Lors des crues pour le système sollicité par pompage, le système aura un fonctionnement similaire au système en condition naturelle. Par contre, les montées de crue lors des pompages vont provoquer une reconstitution des réserves et non l'expulsion habituelle de la faune lessivée à l'échelle de l'ensemble du massif.

Les effets de l'abaissement durable du niveau piézométrique sur les communautés stygobies n'ont pas pu être mesurés ; il n'est pas possible ainsi d'appréhender l'impact d'un abaissement de niveau d'eau provoquant des exondations au niveau d'une partie du massif karstique. L'abaissement durable du niveau d'eau pourrait être à l'origine de destruction temporaire importante de la surface et du volume des habitats nécessaires au développement normal des organismes. Seuls des suivis à long terme, notamment de crues permettraient de savoir si la structure du karst a ménagé des refuges suffisamment efficaces pour assurer la résilience des communautés et le maintien des espèces endémiques du système karstique des Cent Fonts.

Les résultats du suivi hydrobiologique semblent indiquer que les essais de pompage n'auraient pas eu un impact notable sur la communauté de stygobies. L'impact des pompages peut être temporaire, sans que la pérennité de cette faune soit menacée sur l'ensemble du système, qui est compartimenté. La faible turbidité des eaux constatée au cours des essais de pompage aux Cent Fonts, laisse penser que peu de refuges avec des sédiments renfermant de la faune n'a été impacté par le pompage expérimental. Une confirmation de ces résultats nécessiterait de mener des suivis de crue sur du long terme en privilégiant les montées de crues, afin de pouvoir déterminer si la structure du système karstique a ménagé des refuges permettant d'assurer la résilience des communautés et le maintien des espèces endémiques qui font la richesse de ce massif.

8.3. PERSPECTIVES EN TERME D'EXPLOITABILITE DU SYSTEME KARSTIQUE DES CENT FONTS

L'exploitabilité du système karstique des Cent Fonts est fonction du débit à restituer au fleuve Hérault et des contraintes hydrogéologiques liés à l'ouvrage utilisé (le forage actuel ou, par exemple, un nouvel ouvrage de 30 m plus profond) et des conditions hydrologiques les plus défavorables. Le débit à restituer au fleuve Hérault n'a pas encore été déterminé et devra faire l'objet d'une consultation spécifique dans le cadre du SAGE Hérault avec les acteurs concernés. Des éléments d'information ont été présentés dans ce rapport au sujet de l'évaluation de l'impact d'une exploitation du karst des Cent Fonts sur le fleuve Hérault.

Des perspectives en termes d'exploitabilité du système karstique des Cent Fonts peuvent être formulées en prenant en considération les résultats de différents scénarios pour des conditions hydrologiques distinctes. Ces différents scénarios intègrent des débits réservés à restituer au fleuve Hérault, compris entre 200 et 300 l/s, ainsi que des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable tels que présentés au chapitre 2 du présent rapport.

Deux approches de modélisation numérique distinctes ont été développées et utilisées pour la simulation des scénarios d'exploitation de la ressource du système karstique des Cent Fonts. Les résultats des modèles pour cinq probabilités d'occurrence de contextes hydrogéologiques contrastés et pour différents scénarios de pompage ont été inter comparés. C'est sur la base des résultats du modèle le plus pessimiste que des perspectives d'exploitabilité du système karstique des Cent Fonts ont été proposés :

- le scénario ($Q_r=200$ l/s, $Q_{bAEP}=100$ l/s) qui conduirait à pomper jusqu'à 400 l/s lors des semaines de pointe (débit de pompage maximum) et à réserver un débit de 200 l/s au fleuve Hérault apparaît réalisable, avec un ouvrage nécessitant d'être approfondi de 30 m par sécurité, pour les cycles hydrologiques de probabilité d'occurrence « 30 ans sec », voire supérieure. Le volume annuel pompé serait ainsi de 5.3 millions de m^3 , dont 3.7 millions pour l'AEP ;
- pour un débit réservé à restituer à l'Hérault identique ($Q_r=200$ l/s), le débit de base exploité pour l'AEP pourrait atteindre 125 l/s (soit 250 l/s en périodes de pointe en été), pour les cycles hydrologiques de probabilité d'occurrence inférieure ou égale à 20 ans sec (débit de pompage maximum = 450 l/s). Pour un débit réservé à restituer au fleuve Hérault de 250 l/s, le débit d'exploitation pour l'alimentation en eau potable ne pourrait excéder 100 l/s (200 l/s en semaine de pointe) si la probabilité d'occurrence du contexte hydrologique est supérieure à 30 ans « sec » ;
- les scénarios qui conduiraient à pomper plus de 550 l/s (débit de pompage maximum) lors des semaines de pointe n'apparaissent pas réalisable quels que soient les contextes hydrologiques considérés.

Dans l'hypothèse où le système karstique des Cent Fonts venait à être exploité dans le futur, il conviendra de réactualiser les modèles utilisés dans la présente étude en prenant en considération les résultats obtenus en exploitation. En effet, les modèles qui ont été calés pour des durées de sollicitation des réserves de l'ordre de 30 jours,

ont été utilisés en extrapolation pour simuler les évolutions sur de plus grande périodes (durée des périodes de sollicitation des réserves comprise entre 45 et 95 jours selon les résultats des simulations effectuées pour différents contextes hydrologiques contrastés).

Les périodes de turbidité importante observées depuis la fin des essais de pompage de 2005, notamment lors des crues septembre et octobre 2005, sont à prendre en considération dans le cadre des perspectives en terme d'exploitabilité, notamment dans le dimensionnement des stations de traitement (clarification). Ces épisodes de turbidité importantes sont à attribuer au décolmatage d'un ou de plusieurs conduits karstiques remplis d'argiles. En fonction de l'ampleur des décolmatages, on ne peut pas exclure que les propriétés hydrodynamique de la partie du système sollicité par le forage aient changées suite aux crues (augmentation de la perméabilité). Une augmentation de la perméabilité du milieu sollicité par le forage conduirait à des rabattements plus faibles pour un même débit de pompage. Il conviendrait donc, à l'avenir, d'étudier de manière détaillée le fonctionnement du système depuis septembre 2005 et de comparer les résultats avec ceux obtenus antérieurement (juin 1997 – juillet 2005).

9. Références bibliographiques

Aquilina L., Ladouche B. and Dorfliger N. (2006) Water storage and transfer in the epikarst of karstic systems during high flow periods. *Journal of Hydrology*, vol. 327, pp. 472-485.

Aquilina L., Ladouche B. and Dorfliger N. (2005) - Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters. *Applied Geochemistry* 20, 2189–2206

Aquilina L., Ladouche B., Bakalowicz M., Schoen R. et Pételet E. (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume de synthèse générale*. Rap. BRGM R40746. Volume 0, 50 p., 8 fig., 5 tabl., 1 annexe .

Bakalowicz M., Schoen R., Ladouche B., Aquilina L., Pételet E. (1999) - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 1 : Contexte géologique et hydrogéologique* Rap. BRGM R 40747. Volume 1, 75 p., 23 fig., 1 annexe.

Bangoy, L.M., Bidaux P., Drogue C., Plegat R., Pistre S. (1992) - A new method of characterizing fissured media by pumping tests with observation wells.- *Journal of Hydrology*, vol. 138, 1-2, pp. 77-88.

Bardot (2001) - Cartographie de la galerie noyée des Cent Fonts.- Rapport BARDOT & Co n° 2001-09.

Barker, J.A. (1988) - A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock.- *Water Resources Research*, vol. 24, 10, pp. 1796-1804.

Bögli, A. (1980) -*Karst hydrology and physical speleology*.- 284 pp.- Springer Verlag, Berlin.

Bou C., Rouch R. (1967). Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 265m 369-370.

Botosaneanu L. 1998. Sources: aux portes du Styx. Studies in crenobiology. Pages 229-250 *In* The biology of springs and springbrooks, Botosaneanu L. Ed. Leiden, Backhuys publishers

Bourdarot, G. (1996) -*Essais de puits : méthodes d'interprétation*.- 350 pp.- Collection des Cours de l'ENSPM.

Bourdet, D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. (1989) - Use of pressure derivative in well-test interpretation.- *SPE Formation Evaluation*, vol. 4, 2, pp. 293-302.

Bourdet, D., Ayoub J.A., Whittle T.M., Pirard Y.M., Kniazeff V. (1983) - Interpreting well tests in fractured reservoirs.- *World Oil*, vol. 197, 5, pp. 77-87.

Charcosset P. (1998) – Reconstitution d'un segment de la marge ouest-téthysienne au Bathonien dans les Grands Causses et le Bas-Languedoc. *Strata*, série2, vol.31, p.1-311, 109 fig., 6 tab., 15 graph., 10 pl .

Coineau, N. 1998. Syncarida. Pages, 863-876 in Juberthie C. & V. Decu (Eds) "Encyclopaedia Biospeologica Tome 2"

Creuzé des Châtelliers, M., Turquin, M-J., Gibert, J. 1991. Les aquifères: des systèmes biologiques. *Hydrogéologie* 3, 163-185.

Culver, D.C., Sket, B. 2000. Hotspots of subterranean biodiversity in caves and wells. *Journal of Cave and Karst Studies* 62, 11-17.

Danielopol, D.L., Pospisil, P. 2001. Hidden biodiversity in the groundwater of the Danube floodplain National Park (Austria). *Biodiversity and Conservation* 10, 1711-1721.

Danielopol, D.L., Gibert, J., Griebler, C., Gunatilaka, A., Hahn, H.J., Messana, J., Notenboom, J., Sket, B. 2004. Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy. *Environmental Conservation* 31/3, 185-189.

Dole-Olivier, M. J., Marmonier, P. 1992. Patch distribution of interstitial communities: prevailing factors. *Freshwater Biology* 27, 177-191.

Dole-Olivier, M. J., Marmonier, P. 1992. Effects of spates on interstitial assemblages structure. Disturbance-perturbation relationship, rate of recovery. *Hydrobiologia* 230, 49-61.

Dole-Olivier, M. J. Malard F., Ferreira D. & Gibert J. 2005. Biodiversité dans les eaux souterraines- Groundwater Biodiversity. *La Houille Blanche* n°3-2005, 39-44.

Ferreira D. 2005. Biodiversité aquatique souterraine de France: base de données, patrons de distribution et implications en termes de conservation. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 441p.

Ferreira D. Malard F., Dole-Olivier MJ., Gibert J. Obligate groundwater fauna of France: diversity patterns and conservation implications. *Biodiversity and Conservation*, sous presse.

Gibert J., Laurent R. (1982) - L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Ain, France). IV - La dérive d'invertébrés hypogés aquatiques au niveau de l'exutoire principal du massif. *Pol. Arch. Hydrobiol.*, 29, 2, 471-483

Gibert J., Laurent R. & Müller I. (1984) - L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Dpt. Ain, France). VI - Analyse hydrochimique et hydrobiologique d'une crue de printemps au niveau de l'exutoire principal. *Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 5, 71-90

Gibert, J. 1986. Ecologie d'un système karstique jurassien. *Hydrogéologie*, dérive animale, transit de matières, dynamique de la population de *Niphargus* (Crustacé - Amphipode). *Mémoires de Biospéologie* XIII, 1-379.

- Gibert J.** 2001. Protocols for the ASsessment and Conservation of Aquatic Life In the Subsurface (PASCALIS): a European project. Proceedings of "Mapping Subterranean Biodiversity". Special Publication, Karst Water Institute & Laboratoire souterrain de Moulis, 19-21.
- Gibert J.,** Laurent R. 1982. L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Ain, France). IV - La dérive d'invertébrés hypogés aquatiques au niveau de l'exutoire principal du massif. *Pol. Arch. Hydrobiol.*, 29, 2, 471-483
- Gibert J,** Stanford J. A. Dole-Olivier M. J., Ward, J. V. 1994. Basic Attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. Groundwater Ecology (Eds J. Gibert, D.L. Danielopol & J.A. Stanford), pp. 7-40.
- Gibert, J.,** Deharveng, L. 2002. Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. *BioScience* 52/6, 473-481.
- Ginet, R.** 1960. Ecologie, éthologie et biologie de *Niphargus* Annales de spéléologie 15/1-2, 254p.
- Ginet, R.,** Decou, V. 1977. Initiation à la biologie et à l'écologie souterraines. Delarge, Paris, 345p.
- Guillemin C.,** Roux J-C, Gibert J., Leynaud G., Lorgues G., de Marsily G., Margat J., Ollagnon H., Point P., Rémy J-C., Retkowsky Y., Valiron F. & J. Vial - 1991 - Pollution des eaux souterraines en France. Sous la direction de C. Guillermin & J-C. Roux. Ed du BRGM, Manuel et Méthodes n°23, 262p
- Jacob, C.,** Lohman S. (1952) - Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer.- *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 33, 4, pp. 559-569.
- Jeannin, P.,** Maréchal J. (1995) - Lois de pertes de charge dans les conduits karstiques : base théorique et observations.- *Bulletin du centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, vol. 14, 149-176.
- Juberthie, C.** 1995. Underground habitats and their protection. Nature and Environment, 72. Council of Europe Press, Strasbourg, 160p.
- Juberthie-Jupeau, L.** 1974. Les caractères liés à l'incubation chez *Troglocaris anophthalmus* et *Troglocaris inermis* Crustacés décapodes hypogés. Annales de Spéléologie, 29, 167-171
- Juberthie-Jupeau L** 1975. La ponte d'un crustacé Décapode souterrain : cycle saisonnier et influence biologique. Annales de Spéléologie, 30, 167-171.
- Ladouche B.,** Aquilina L., Petelet E., Bakalowicz M. et Schoen R. (1999) - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 4 : Interprétation des données hydrochimiques*. Rap. BRGM R 40940 Volume 4, 170 p., 67 fig., 25 tabl.
- Ladouche B.,** Dörfliger N., Pouget R., Petit V., Thiery D., Golaz C. (2002) - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Rapport du programme 1999-2001-Buèges. BRGM/RP-51584-FR, 200 p., 111 fig., 9 tabl., 3 photos, 4 ann.

Ladouche B., Dörfliger N. (2004) Modélisation hydrogéologique du système karstique des Cent Fonts : Vers la constitution d'un outils de prévision. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-53595-FR, 78 p.

Ladouche B., Maréchal J.C., Dörfliger N., Lachassagne P., Lanini S., Le Strat P. (2005) - Pompages d'essai sur le système karstique des Cent Fonts (Cne de Causse de la Selle, Hérault), Présentation et interprétation des données recueillies, BRGM/RP 54426-FR, 82 ill, 45 tabl., 9 ann., 245 pp.

Lencastre, A. (1966) -*Manuel d'hydraulique générale*.- 411 pp.- Ed. Eyrolles, Paris.

Le Strat P. (1981) – Jurassique des causses Languedoc. Bordure cévenole. Essai de synthèse géologique. Rapport BRGM 81 SGN 388 GEO

Le Strat P. (1987) – Dynamique des dépôts bathoniens autour des Cévennes. Rapport BRGM 87 SGN 679 GEO.

Le Strat P. (1992) – Groupe français d'étude du Jurassique. Excursion en Languedoc. Documents sur le Jurassique au Sud des Cévennes. Université de Nantes.

Malard F, Turquin MJ. 1996. Inventaire de la faune aquatique souterraine du champ captant de Crépieux Charmy. Campagnes de prélèvements du mois d'août 1994. Rapport interne, 26p.

Malard F, Gibert J., Laurent, R. 1997. L'aquifère de la source du Lez: un réservoir d'eau... et de biodiversité. *Karstologia* 30, 49-54.

Marmonier, P., Dole M-J. 1986. Les Amphipodes des sédiments d'un bras court-circuité du Rhône: logique de répartition et réaction aux crues. *Sciences de l'eau* 5, 461-486.

Mangin A (1970) - Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrue et de tarissement, *Annales de Spéléologie*, t 25, 3, pp 581-609.

Mangin A., (1975) - contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse de Doctorat, Université de Dijon, (Ann. Spéol., 1974, 3, pp. 283-332, 1974, 29, 4, pp. 495-601 ; 1975, 30., 1, pp 21-124).

Marechal, J.C., Perrochet P. (2003) - New analytical solution for the study of hydraulic interaction between Alpine tunnels and groundwater.- *Bulletin De La Societe Geologique De France*, vol. 174, 5, pp. 441-448.

Pinault J.L. Plagnes V., Aquilina L., Bakalowicz M. (2001) - Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - Characterization of karst system functioning., *Water Resources Research*, Vol. 37, n° 8, p. 2191-2204.

Pinault J.L. (2001) – Manuel d'utilisateur de TEMPO : logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Projet Modhydro. Rap. BRGM/RP-51459-FR. 221 p.

Pinault J.L., Amraoui N., Golaz.C. (2005) Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resources Research*, Vol.41

Perrochet, P. (2004) - A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown.- *Hydrogeology Journal*, vol., DOI: 10.1007/s10040-004-0355-z, pp.

Plagnes V. (1997) - Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux, Thèse, Univ. Montpellier.

Reygrobellet JL & Luczyszyn H. 1993. Investigations hydrobiologiques sur la nappe (Forage F3) alimentant la station de pompage d'Arcine (AEP du syndicat) et sur le ruisseau d'Arcine. Domaine Hydrogéologique Agence de l'Eau RMCn°542, 34p.

Rouch, R. (1970) - Le système karstique du Baget. Le phénomène d' « hémorragie » au niveau de l'exutoire principal. *Annales de Spéléologie*, 25, 665-709.

Rouch, R. 1977. Considérations sur l'écosystème karstique *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 284, 1101-1103.

Rouch, R. 1980. Le système karstique du Baget. X. La communauté des Harpacticides. Richesse spécifique, diversité et structures d'abondances de la nomocénose hypogée. *Annales de Limnologie*, 16, 1-20.

Rouch, R. 1982. Le système karstique du Baget. XII. La communauté des Harpacticides. Sur l'interdépendance des nomocénoses épigée et hypogée. *Annales de Limnologie*, 18, 41-54.

Rouch, R., Juberthie-Jupeau, L., Juberthie C 1968. Recherches sur les eaux souterraines - 3 – Essai d'étude du peuplement de la zone noyée d'un karst. *Annales de spéléologie*, 23/4, 717-733.

Rouch, R. Pitzalis A., Descouens A. (1993) - Effets d'un pompage à gros débit sur le peuplement des Crustacés d'un aquifère karstique. *Annales de Limnologie* 9/1, 15-29.

Samani N. and Ebrahimi B. (1996) Analysis of spring hydrographs for hydrogeological evaluation of karst aquifer system, *Theoretical and applied karstology journal*, vol. 9, March-April, pp. 97–112.

Schoen R., Ladouche B., Cubizolles J., Aquilina L. et Bakalowicz M. (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 2 : Moyens mis en œuvre* Rap. BRGM R 40748 - Volume 2, 69 p., 22 fig., 1 annexe (1 fig., 12 tab.).

Schoen R., Bakalowicz M., Ladouche B. et Aquilina L. (1999) – Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. *Volume 3 : Interprétation des données hydrologiques* Rap. BRGM R 40939 Volume 3, 91 p., 16 fig., 4 annexes.

TERCIA, Acer campestre. 2001. Etude d'impact du projet de forage des Cents Fonts.

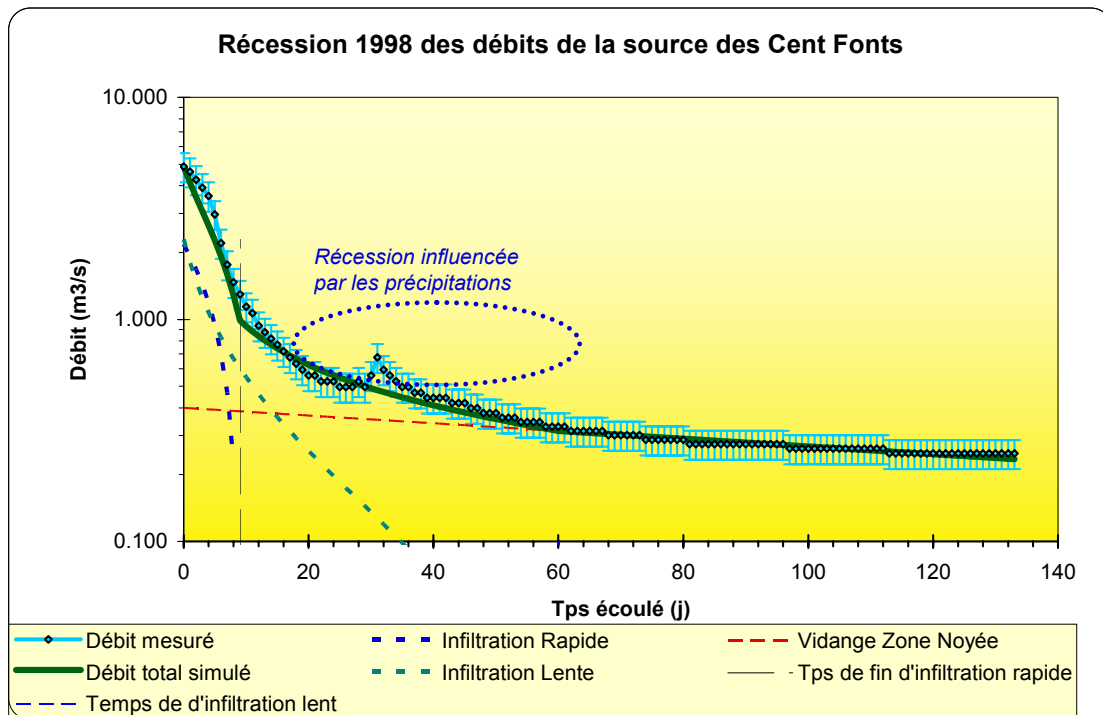
Thiem, G. (1906) -*Hydrologische Methoden*.- J.M. Gebhardt, Leipzig.

Turquin MJ. 1981. The tactics of dispersal of two species of *Niphargus* (perennial, Troglobitic Amphipoda); Prodeedings 8th International Congress of speleology, Bowling-Green (USA), B.F. Beck Ed., 353-354.

Vigneux, E., Keith, P., Noël, P. 1993. Atlas préliminaire des crustacés Décapodes d'eau douce de France. Publication MNHN, Paris, 56p.

Annexe 1

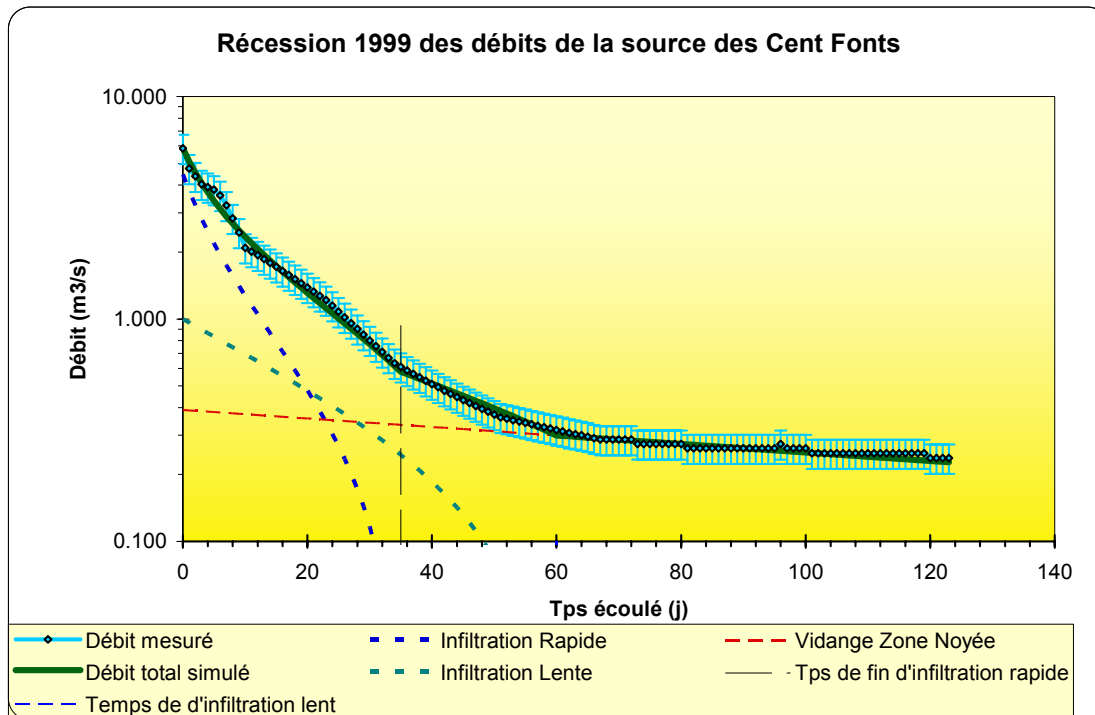
Analyse des Courbes de recession de la source des Cent Fonts (période 1998-2005)



Début Récession	01/05/98
Fin Récession	11/09/98
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.5
Q0 rapide (m³/s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.005
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	9
Débit d'infiltration (à t=0)	2.178
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.25
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	60
qs_2 (débit d'infiltration à t=0)	2.3
Coef tarissement Zone Noyée (j-1)	0.0040
Qo Zone noyée (m³/s)	0.400

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.111
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.017
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.77
Critère de Nash (qualité de la simulation)	93.73
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	0.93
Volume d'infiltration lente (million de m3)	1.66
Volume dynamique (million de m3)	8.64

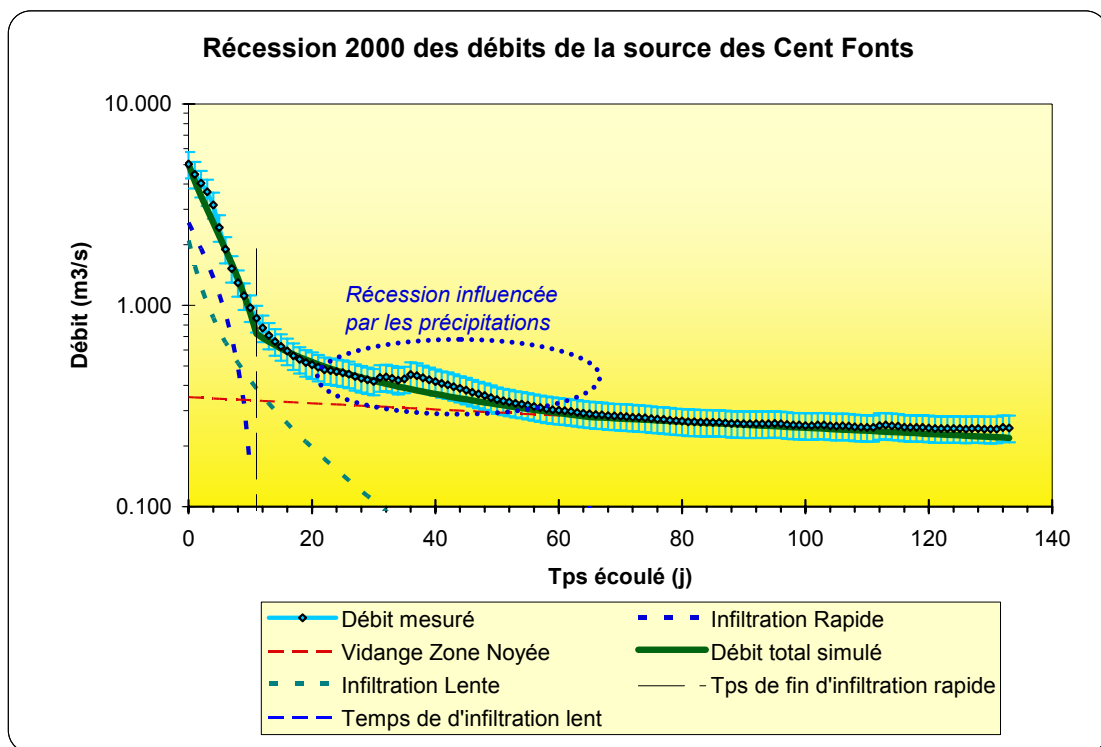
Annexe_Illustration 1



Début Récession	05/05/99
Fin Récession	05/09/99
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.5
Q0 rapide (m³/s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.150
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	35
Débit d'infiltration (à t=0)	4.460
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.02
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	60
q0_2 (débit d'infiltration à t=0)	1
Coef tarissement Zone Noyée (j ⁻¹)	0.0044
Qo Zone noyée (m³/s)	0.390

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.029
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.017
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.73
Critère de Nash (qualité de la simulation)	99.04
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	3.23
Volume d'infiltration lente (million de m3)	1.97
Volume dynamique (million de m3)	7.66

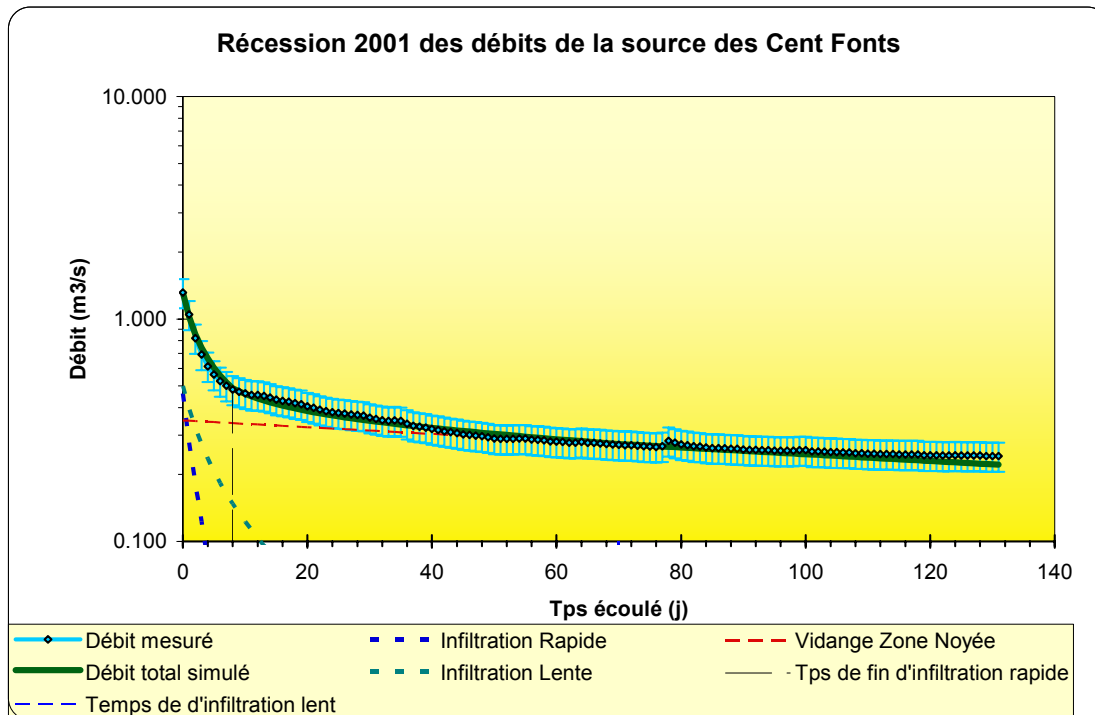
Annexe_Illustration 2



Début Recession	11/05/00
Fin Recession	21/09/00
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.5
Q0 rapide (m ³ /s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.050
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	11
Débit d'infiltration (à t=0)	2.573
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.32
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	65
Qo_2 (débit d'infiltration à t=0)	2.1
Coef tarissement Zone Noyée (j-1)	0.0035
Qo Zone noyée (m ³ /s)	0.350

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.091
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.015
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.74
Critère de Nash (qualité de la simulation)	96.85
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	1.16
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	1.36
Volume dynamique (million de m ³)	8.64

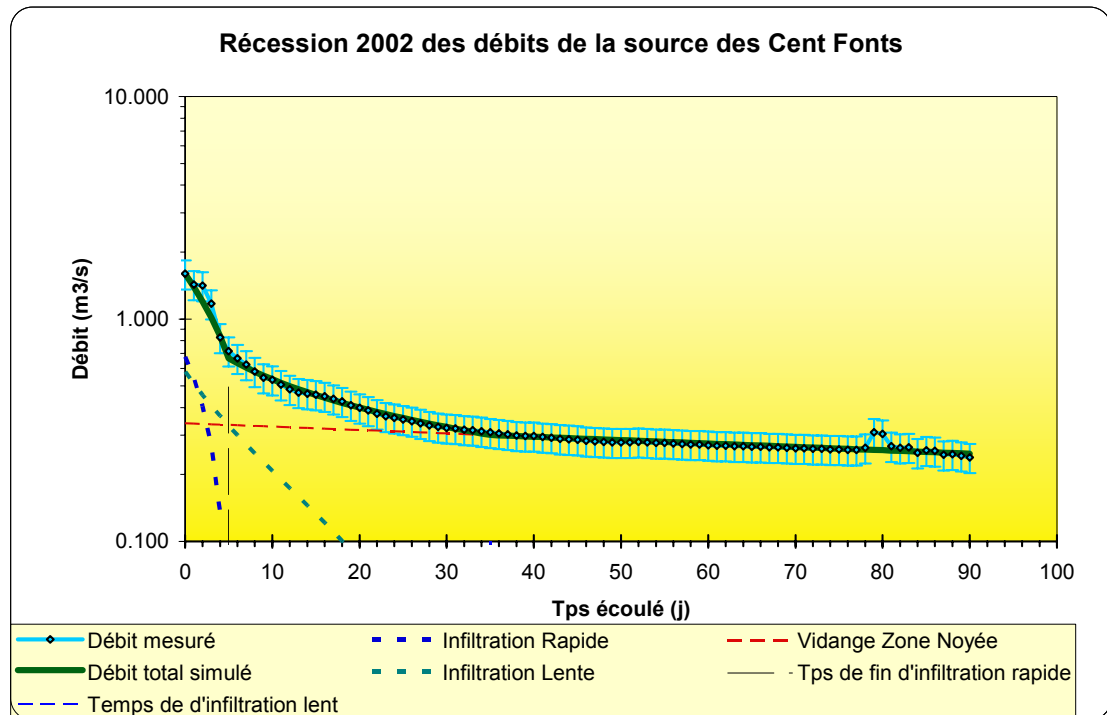
Annexe_Illustration 3



Début Récession	13/05/01
Fin Récession	21/09/01
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.5
Q0 rapide (m³/s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.450
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	8
Débit d'infiltration (à t=0)	0.463
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.25
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	70
q0_2 (débit d'infiltration à t=0)	0.5
Coef tarissement Zone Noyée (j ⁻¹)	0.0035
Q0 Zone noyée (m³/s)	0.350

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.125
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.014
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.39
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.31
Volume d'infiltration rapide (million de m³)	0.11
Volume d'infiltration lente (million de m³)	0.38
Volume dynamique (million de m³)	8.64

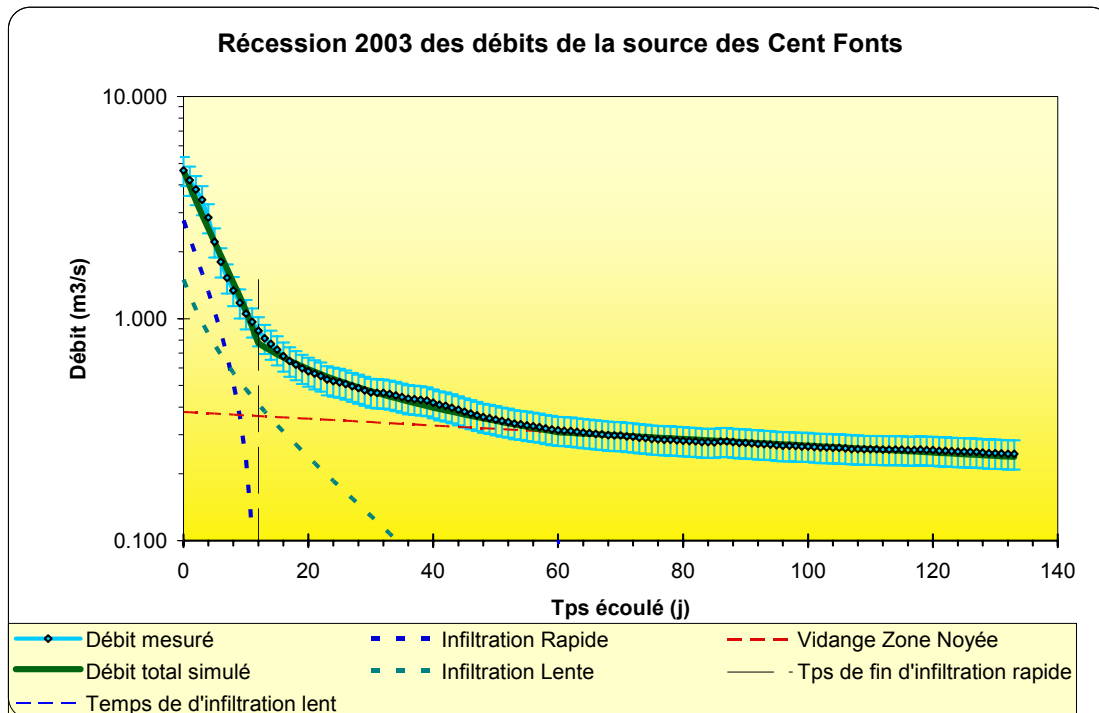
Annexe_Illustration 4



Début Recession	08/06/02
Fin Recession	06/09/02
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.1
Q0 rapide (m ³ /s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.001
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	5
Débit d'infiltration (à t=0)	0.677
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.1
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	35
qs_2 (débit d'infiltration à t=0)	0.58
Coef tarissement Zone Noyée (j-1)	0.0035
Qo Zone noyée (m3/s)	0.340

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.200
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.029
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.60
Critère de Nash (qualité de la simulation)	97.95
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	0.18
Volume d'infiltration lente (million de m3)	0.49
Volume dynamique (million de m3)	8.39

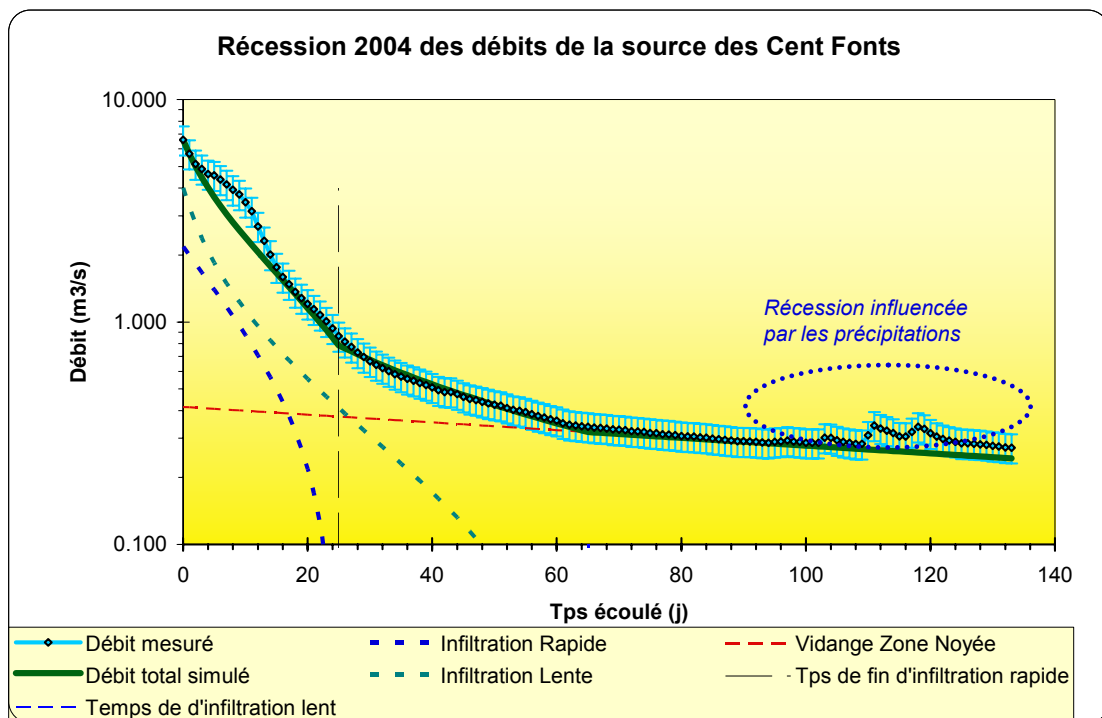
Annexe_Illustration 5



Début Récession	22/04/03
Fin Récession	03/09/03
$\alpha_{\text{rapide}} (j^{-1})$	0.1
$Q_0 \text{ rapide (m}^3/\text{s)}$	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.100
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	12
Débit d'infiltration (à t=0)	2.769
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.16
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	60
$q_{0,2}$ (débit d'infiltration à t=0)	1.5
Coef tarissement Zone Noyée (j^{-1})	0.0035
Q_0 Zone noyée (m³/s)	0.380

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.083
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.017
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.69
Critère de Nash (qualité de la simulation)	98.373
Volume d'infiltration rapide (million de m³)	1.19
Volume d'infiltration lente (million de m³)	1.37
Volume dynamique (million de m³)	9.38

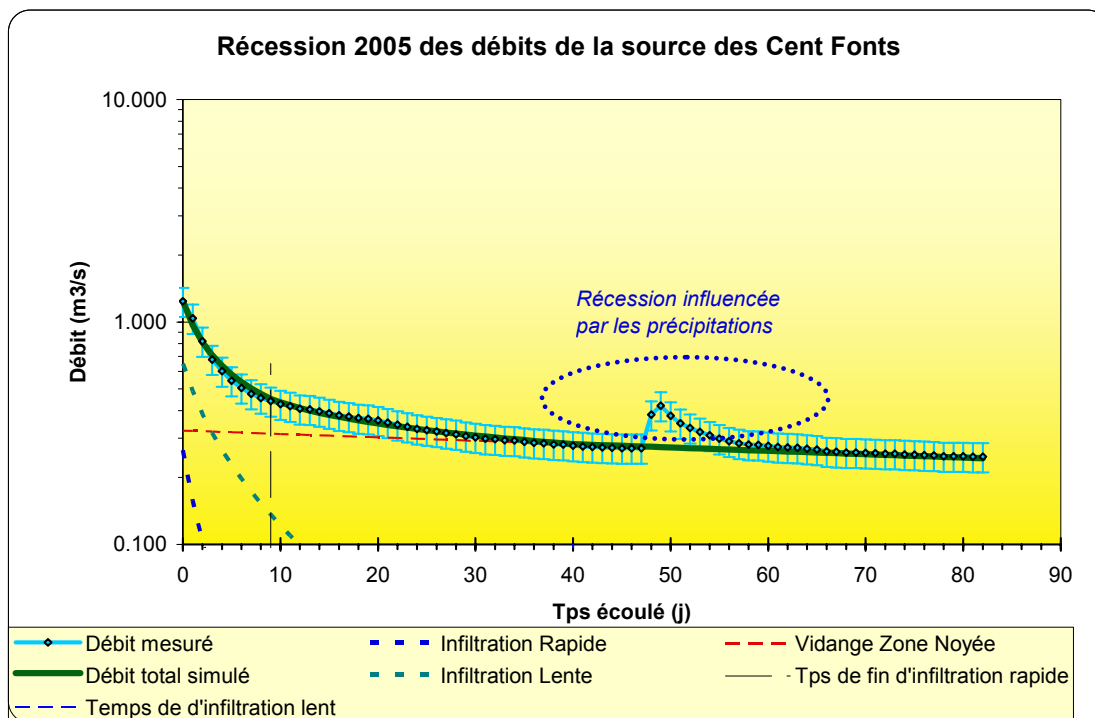
Annexe_Illustration 6



Début Recession	30/04/04
Fin Recession	10/10/04
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.1
Q0 rapide (m³/s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.050
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	25
Débit d'infiltration (à t=0)	2.178
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.2
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	65
qs_2 (débit d'infiltration à t=0)	4
Coef tarissement Zone Noyée (j-1)	0.0040
Qo Zone noyée (m³/s)	0.415

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.040
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.015
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.84
Critère de Nash (qualité de la simulation)	93.239
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	1.83
Volume d'infiltration lente (million de m3)	3.36
Volume dynamique (million de m3)	8.96

Annexe_Illustration 7



Début Recession	27/04/05
Fin Recession	18/07/05
alpha_rapide (j ⁻¹)	0.1
Q0 rapide (m ³ /s)	0
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.500
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	9
Débit d'infiltration (à t=0)	0.265
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.3
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	40
q _{0,2} (débit d'infiltration à t=0)	0.65
Coef tarissement Zone Noyée	0.0035
Q ₀ Zone noyée (m ³ /s)	0.325

vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.111
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.025
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.39
Critère de Nash (qualité de la simulation)	87.446
Volume d'infiltration rapide (million de m ³)	0.06
Volume d'infiltration lente (million de m ³)	0.36
Volume dynamique (million de m ³)	8.02

Annexe_Illustration 8

Début Recession	01/05/98	05/05/99	11/05/00	13/05/01	08/06/02	22/04/03	30/04/04	27/04/05	moyenne	2sigma
Fin Recession	11/09/98	05/09/99	21/09/00	21/09/01	06/09/02	03/09/03	10/10/04	18/07/05		
Coef d'hétérogénéité d'écoulement rapide	0.005	0.150	0.050	0.450	0.001	0.100	0.050	0.500	0.16	0.20
Tps de fin d'infiltration rapide (en jour)	9	35	11	8	5	12	25	9	14.25	10.29
Débit d'infiltration (à t=0)	2.178	4.460	2.573	0.463	0.677	2.769	2.178	0.265	1.95	1.42
Coef d'hétérogénéité d'écoulement lent	0.25	0.02	0.32	0.25	0.1	0.16	0.2	0.3	0.20	0.10
Tps de fin d'infiltration Lent (en jour)	60	60	65	70	35	60	65	40	57	13
qo_2 (débit d'infiltration à t=0)	2.3	1	2.1	0.5	0.58	1.5	4	0.65	1.58	1.20
Coef tarissement Zone Noyée (j-1)	0.0040	0.0044	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0040	0.0035	0.0037	0.0004
Qo Zone noyée (m3/s)	0.400	0.390	0.350	0.350	0.340	0.380	0.415	0.325	0.37	0.03
vitesse moyenne d'infiltration rapide	0.111	0.029	0.091	0.125	0.200	0.083	0.040	0.111	0.10	0.05
vitesse moyenne d'infiltration lente	0.017	0.017	0.015	0.014	0.029	0.017	0.015	0.025	0.02	0.01
Parametre i (retard à l'infiltration)	0.77	0.73	0.74	0.39	0.60	0.69	0.84	0.39	0.64	0.17
Critère de Nash (qualité de la simulation)	93.73	99.04	96.85	97.31	97.95	98.37	93.24	87.45	95.49	
Volume d'infiltration rapide (million de m3)	0.93	3.23	1.16	0.11	0.18	1.19	1.83	0.06	1.08	1.07
Volume d'infiltration lente (million de m3)	1.66	1.97	1.36	0.38	0.49	1.37	3.36	0.36	1.37	1.01
Volume dynamique (million de m3)	8.64	7.66	8.64	8.64	8.39	9.38	8.96	8.02	8.54	0.53

Annexe 2

Contextes hydrologiques des débits naturels des Cent Fonts et des pertes de la Buèges estimés par l'approche prévisionnelle à l'aide des sous modèles de transfert (calculs réalisés à partir des 3 chroniques de pluie : run 1, run 2 et run 3 générés par le modèle prévisionnel)

Tableau 26 - Contexte hydrologique de la source des Cent Fonts lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenus pour le run 1).

run 1	juin-06	juin-07	juin-08	juin-09	juin-10	juin-11	juin-12	juin-13	juin-14	juin-15
	>30ans_sec	5ans_sec	10ans humide	30ans_sec	10ans humide	4ans humide (3èmeQ)	10ans_sec	30ans_sec	5ans humide	20ans humide
moyenne	295	444	825	325	826	562	408	334	614	931
2sigma	27	79	333	40	142	143	43	22	112	323
min	260	348	440	276	652	399	351	302	501	543
1erQ	273	380	552	292	710	420	372	315	532	654
médiane	289	424	760	315	796	546	399	331	572	857
3èmeQ	313	495	981	351	912	641	438	351	667	1142
max	352	619	1632	413	1147	894	499	377	895	1661

run 1	juil-06	juil-07	juil-08	juil-09	juil-10	juil-11	juil-12	juil-13	juil-14	juil-15
	>30ans_sec	10ans_sec	2ans (médiane)	>20ans humide	>20ans humide	10ans humide	5ans_sec	30ans_sec	20ans humide	10ans humide
moyenne	251	303	346	589	570	418	318	275	471	440
2sigma	51	22	39	302	40	61	17	16	57	45
min	220	269	294	264	510	342	291	248	400	382
1erQ	227	284	313	371	536	367	303	260	424	402
médiane	240	301	337	495	566	404	316	277	458	431
3èmeQ	251	320	372	751	602	456	332	288	509	471
max	445	345	429	1306	645	556	348	300	597	533

run 1	Aout 06	Aout 07	Aout 08	Aout 09	Aout 10	Aout 11	Aout 12	Aout 13	Aout 14	Aout 15
	>30ans_sec	>20ans humide	5ans_sec	20ans humide	20ans humide	5ans humide	10ans humide	30ans_sec	10ans humide	10ans humide
moyenne	266	564	262	421	463	341	410	220	363	353
2sigma	57	381	18	212	25	41	103	11	19	22
min	203	241	237	248	425	290	281	204	333	321
1erQ	220	254	248	269	440	310	324	211	347	334
médiane	248	267	261	307	460	331	396	219	362	351
3èmeQ	298	802	274	594	483	368	494	227	378	371
max	404	1425	303	920	506	433	628	244	397	397

Tableau 27 - Contexte hydrologique de la source des Cent Fonts lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 2).

run 2	juin-06	juin-07	juin-08	juin-09	juin-10	juin-11	juin-12	juin-13	juin-14	juin-15
	>20ans humide	5ans humide	5ans humide	5ans_sec	>30ans_sec	2ans (médiane)	2ans (médiane)	2ans (médiane)	20ans_sec	5ans humide
moyenne	1757	617	660	904	304	472	478	513	358	683
2sigma	806	56	113	446	24	112	89	181	68	243
min	807	538	528	538	271	345	373	326	273	417
1erQ	1045	574	576	586	285	381	405	371	299	484
médiane	1525	609	618	647	301	439	454	455	343	604
3èmeQ	2510	649	726	1187	322	540	534	607	412	835
max	3288	754	927	1944	354	731	680	953	507	1248

run 2	juil-06	juil-07	juil-08	juil-09	juil-10	juil-11	juil-12	juil-13	juil-14	juil-15
	>20ans humide	10ans humide	20ans humide	20ans humide	>30ans_sec	20ans_sec	2ans (médiane)	4ans_sec (1erQ)	>30ans_sec	2ans (médiane)
moyenne	590	437	461	623	246	299	338	329	241	349
2sigma	89	43	31	147	14	22	24	59	16	31
min	477	380	415	457	225	267	298	260	218	306
1erQ	515	402	435	504	234	280	317	280	227	324
médiane	570	428	457	578	247	296	340	311	237	345
3èmeQ	651	467	484	711	258	316	358	366	253	372
max	782	530	522	969	269	341	378	465	271	410

run 2	Aout 06	Aout 07	Aout 08	Aout 09	Aout 10	Aout 11	Aout 12	Aout 13	Aout 14	Aout 15
	>20ans humide	5ans humide	20ans humide	20ans humide	>30ans_sec	20ans humide	10ans humide	20ans_sec	>30ans_sec	2ans (médiane)
moyenne	742	344	455	621	207	528	372	233	201	278
2sigma	296	19	153	193	11	411	115	14	9	15
min	423	316	358	431	189	236	269	213	187	253
1erQ	450	328	373	465	198	247	281	222	194	267
médiane	786	344	388	548	206	258	296	232	200	278
3èmeQ	975	360	408	731	217	819	439	245	210	290
max	1259	377	835	1084	224	1474	648	258	217	304

Tableau 28 - Contexte hydrologique de la source des Cent Fonts lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenus pour le run 3).

run 3	juin-06	juin-07	juin-08	juin-09	juin-10	juin-11	juin-12	juin-13	juin-14	juin-15
	20ans_sec	>30ans_sec	4ans_sec (1erQ)	>20ans humide	2ans (médiane)	4ans_sec (1erQ)	5ans humide	5ans_sec	20ans_sec	>30ans_sec
moyenne	385	263	448	1391	542	450	622	421	373	300
2sigma	94	13	101	670	78	25	138	57	25	19
min	281	243	334	690	417	406	464	350	337	273
1erQ	308	251	367	855	480	433	509	374	353	285
médiane	355	262	418	1163	541	451	581	407	371	298
3èmeQ	440	274	509	1770	603	470	706	459	392	314
max	607	286	683	3007	681	491	942	546	419	336

run 3	juil-06	juil-07	juil-08	juil-09	juil-10	juil-11	juil-12	juil-13	juil-14	juil-15
	30ans_sec	>30ans_sec	20ans_sec	20ans humide	2ans (médiane)	4ans humide (3èmeQ)	10ans humide	10ans_sec	10ans_sec	>30ans_sec
moyenne	246	222	295	535	356	369	407	307	308	250
2sigma	17	11	19	66	28	19	28	24	15	13
min	220	206	268	448	315	341	364	271	284	230
1erQ	231	214	280	481	333	353	384	289	296	239
médiane	245	222	293	523	352	367	404	305	308	250
3èmeQ	260	231	309	582	377	383	428	328	321	261
max	278	242	330	673	412	403	459	347	335	271

run 3	Aout 06	Aout 07	Aout 08	Aout 09	Aout 10	Aout 11	Aout 12	Aout 13	Aout 14	Aout 15
	>30ans_sec	>30ans_sec	10ans humide	20ans humide	2ans (médiane)	4ans humide (3èmeQ)	5ans humide	20ans_sec	20ans_sec	>30ans_sec
moyenne	225	191	381	550	285	316	333	248	258	229
2sigma	23	11	322	151	16	13	17	13	16	15
min	197	176	227	405	260	296	306	227	230	210
1erQ	211	182	236	431	272	305	320	238	246	221
médiane	216	190	247	490	284	315	333	248	259	225
3èmeQ	236	198	260	632	299	325	347	259	270	235
max	283	224	1268	921	313	339	362	269	282	267

Tableau 29 - Contexte hydrologique de pertes de la Buèges lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 1 ».

run 1	juin-06	juin-07	juin-08	juin-09	juin-10	juin-11	juin-12	juin-13	juin-14	juin-15
moyenne	36	190	482	50	240	111	90	106	166	448
2sigma	12	81	247	17	104	42	30	43	81	196
min	21	88	197	29	115	57	48	53	84	195
1erQ	26	122	285	36	156	73	64	70	96	280
médiane	33	173	416	47	216	109	89	97	130	403
3èmeQ	44	247	615	62	300	137	111	136	236	613
max	60	359	1082	85	457	200	150	197	316	816

run 1	juil-06	juil-07	juil-08	juil-09	juil-10	juil-11	juil-12	juil-13	juil-14	juil-15
moyenne	24	49	102	215	68	67	29	33	106	102
2sigma	7	17	41	133	20	25	8	9	42	40
min	15	28	50	24	42	35	19	22	54	51
1erQ	17	35	67	138	51	45	23	26	71	68
médiane	22	46	93	203	64	61	28	31	97	93
3èmeQ	30	61	131	305	82	85	35	39	136	130
max	38	84	188	485	110	119	46	51	194	186

run 1	Aout 06	Aout 07	Aout 08	Aout 09	Aout 10	Aout 11	Aout 12	Aout 13	Aout 14	Aout 15
moyenne	20	184	31	123	34	25	114	60	35	32
2sigma	6	180	8	71	9	5	76	41	9	8
min	12	19	21	48	26	18	17	17	24	21
1erQ	15	23	25	66	29	21	68	19	27	25
médiane	18	27	30	95	32	24	97	63	33	31
3èmeQ	24	331	37	190	37	28	169	91	41	38
max	32	528	48	265	65	34	265	140	52	49

Tableau 30 - Contexte hydrologique de pertes de la Buèges lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 2).

run 2	juin-06	juil-07	juin-08	juin-09	juin-10	juin-11	juin-12	juin-13	juin-14	juin-15
moyenne	1006	111	116	333	42	187	87	66	67	319
2sigma	410	40	43	207	14	80	32	25	24	105
min	435	59	62	122	25	85	47	34	37	155
1erQ	636	77	80	169	31	119	60	45	50	223
médiane	939	102	107	238	39	169	80	60	59	330
3èmeQ	1404	139	146	496	52	243	110	83	83	405
max	1631	194	205	775	70	355	152	118	122	495

run 2	juil-06	juil-07	juil-08	juil-09	juil-10	juil-11	juil-12	juil-13	juil-14	juil-15
moyenne	216	39	40	206	18	48	31	23	23	82
2sigma	94	9	10	90	3	16	7	5	6	32
min	99	28	27	93	14	27	22	16	15	41
1erQ	138	32	32	130	15	34	25	18	18	55
médiane	195	37	38	185	17	44	30	22	22	75
3èmeQ	282	45	47	269	20	59	36	26	27	104
max	413	57	60	397	24	81	45	33	36	148

run 2	Aout 06	Aout 07	Aout 08	Aout 09	Aout 10	Aout 11	Aout 12	Aout 13	Aout 14	Aout 15
moyenne	169	23	22	191	11	81	18	19	11	26
2sigma	102	2	2	97	1	85	1	10	2	6
min	57	19	19	72	10	17	16	12	9	17
1erQ	76	21	20	116	10	20	17	13	10	20
médiane	160	22	22	168	11	24	18	14	11	24
3èmeQ	245	24	24	253	12	160	19	15	13	30
max	379	27	27	401	13	254	21	42	14	39

Tableau 31 - Contexte hydrologique de pertes de la Buèges lors des différents étiages simulés « période 2006-2016, résultats obtenu pour le run 2).

run 3	juin-06	juin-07	juin-08	juin-09	juin-10	juin-11	juin-12	juin-13	juin-14	juin-15
moyenne	292	190	482	50	240	111	90	106	166	448
2sigma	73	81	247	17	104	42	30	43	81	196
min	179	88	197	29	115	57	48	53	84	195
1erQ	244	122	285	36	156	73	64	70	96	280
médiane	278	173	416	47	216	109	89	97	130	403
3èmeQ	330	247	615	62	300	137	111	136	236	613
max	454	359	1082	85	457	200	150	197	316	816

run 3	juil-06	juil-07	juil-08	juil-09	juil-10	juil-11	juil-12	juil-13	juil-14	juil-15
moyenne	32	49	102	215	68	67	29	33	106	102
2sigma	45	17	41	133	20	25	8	9	42	40
min	15	28	50	24	42	35	19	22	54	51
1erQ	17	35	67	138	51	45	23	26	71	68
médiane	23	46	93	203	64	61	28	31	97	93
3èmeQ	31	61	131	305	82	85	35	39	136	130
max	272	84	188	485	110	119	46	51	194	186

run 3	Aout 06	Aout 07	Aout 08	Aout 09	Aout 10	Aout 11	Aout 12	Aout 13	Aout 14	Aout 15
moyenne	20	184	31	123	34	25	114	60	35	32
2sigma	6	180	8	71	9	5	76	41	9	8
min	12	19	21	48	26	18	17	17	24	21
1erQ	15	23	25	66	29	21	68	19	27	25
médiane	18	27	30	95	32	24	97	63	33	31
3èmeQ	24	331	37	190	37	28	169	91	41	38
max	32	528	48	265	65	34	265	140	52	49

Annexe 3

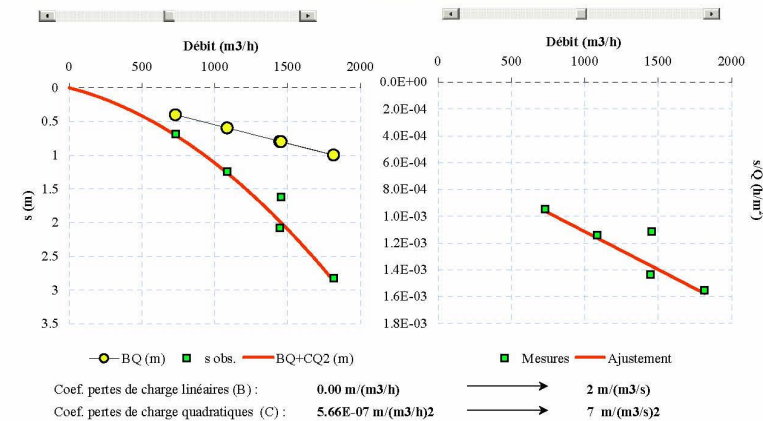
Éléments d'informations complémentaires au modèle de réservoir couplé à une solution analytique

EVALUATION DES PERTES DE CHARGE AU PUIT DE POMPAGE

Opération : CENT-FONTS
Localisation : Hérault
Société : BRGM
Date pompage : 27-juil-05

Nom de l'ouvrage : CF
Type d'ouvrage : PUIT
Aquifère testé : CALCAIRES ET DOLOMIE

Pompage par paliers	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Débit (m3/h)	730	1085	1816	1447	1455
Temps de pompage (min)	330	330	330	330	330
Temps de remontée (min)	0	0	0	0	0
Rabatement observé (m)	0.69	1.24	2.82	2.08	1.62



CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUIT DE POMPAGE
INFORMATIONS GÉNÉRALES

Essai de puits		Limites hydrauliques d'exploitation	
Niveau statique initial (m/sol)		Niveau statique en basses eaux (m)	
Profondeur pompe (m/sol)		Amplitudes saisonnières (m)	
Type pompe		Débit d'exploitation recommandé (m3/h)	
Diamètre chambre de pompage (mm)		Pertes de charge linéaires (m)	0.00
Position crépine (m/sol)		Pertes de charge quadratiques (m)	0.00
Type crépine		Niveau dynamique en basses eaux (m)	0.00
Nature du massif filtrant			

Informations sur l'ajustement					
Q/s calculé (m2/h)	1038.73	859.47	634.13	730.85	1818.78
Q/s observé (m2/h)	1057.97	875.00	643.97	695.67	898.15
Ecart Q/s cal- Q/s obs. (m2/h)	19.24	15.53	9.85	-35.18	-920.64
Rabatement calculé (m)	0.70	1.26	2.86	1.98	2.00
Ecart Scal-Sobs (m)	0.01	0.02	0.04	-0.10	0.38

WINISAP/TEMPO version 5.07.03

Annexe_Illustration 9. Evaluation et simulation de pertes de charge quadratiques dans un drain karstique

Ecoulements en charge - estimation de pertes de charge quadratiques

Conduite circulaire de diamètre D

	Drain 1		Drain 2	
Diamètre	D=	1.65 m	D=	1.25 m
Coefficient de viscosité cinématique	v=	1.17E-06 m²/s	v=	1.17E-06 m²/s
Vitesse moyenne	U=	0.116 m/s	U=	0.101 m/s
Débit	Q=	0.248 m³/s	Q=	0.124 m³/s
Section	S=	2.14 m²	S=	1.23 m²
Rayon hydraulique	Rh=	0.4125 m	Rh=	0.3125 m
Diamètre hydraulique	Dh=	1.65 m	Dh=	1.25 m
Coefficient de Manning-Strickler	Ks=	20 m ^(1/3) /s	Ks=	20 m ^(1/3) /s
Longueur du drain karstique	L=	5000 m	L=	5000 m

Nombre de Reynolds

Re=	1.63E+05 (-)	Re=	1.07E+05 (-)
-----	--------------	-----	--------------

Pertes de charge quadratiques linéaires

i	0.000109079 (-)	i	0.00011988 (-)
---	-----------------	---	----------------

Pertes de charge sur un drain de longueur L

PdeC drain1	0.545 (m)	PdeC drain2	0.599 (m)
-------------	-----------	-------------	-----------

Pertes de chage totales

PdeC	1.145 (m)
------	-----------

Note : on considère que dans le premier tronçon de drain transite le débit de pompage moins la contribution de l'Hérault (30 l/s) et moins la moitié de la contribution naturelle de la source (122,5 l/s) ; la moitié de ce débit transite dans el second tronçon

Courbe de tarage des Cent Fonts exprimée en fonction de la différence de niveau entre le drain karstique (mesuré au forage CGE) et l'Hérault (mesuré au niveau de la Mire).

Date	Niveau piézométrique Forage CGE m, NGF	Débit source Cent Fonts (l/s)	Hauteur Hérault à la Mire (m)	Niveau piézométrique Hérault m, NGF	Différence [H CF(m, NGF)-H Hérault (m,NGF)] en m
29-août-97	77.44	300	0.08	76.37	1.07
19-sept.-97	77.25	280	0.05	76.34	0.91
05-nov.-97	86.59	11000	3.20	79.49	7.09
07-nov.-97	83.57	6000	1.60	77.89	5.68
08-nov.-97	83.12	5000	1.36	77.65	5.47
24-juil.-98	77.46	348	0.09	76.38	1.08
12-janv.-99	81.74	2600	0.71	77.00	4.74
19-avr.-05	77.98	345	0.19	76.48	1.50
02-mai-05	78.70	590	0.25	76.54	2.16
	<i>Hypothèse</i>	10			0.01

Paramètres de la courbe de tarage

Résumé pour la variable dépendante :

Variable	Nombre de valeurs	Moyenne	Ecart-type
Y	10	2647.300	3642.874

Résumé pour les variables quantitatives :

Variable	Moyenne	Ecart-type
X	2.971	2.511

Résultats pour le modèle ajusté :

Modèle	Equation	R ²	SCR
pr1+pr2*X1^1+pr3*X1^2+pr4*X1^3			
	82.103+268.174*X1^1-123.754*X1^2+43.093*X1^3	0.995	592088.265

Coefficients d'ajustement :

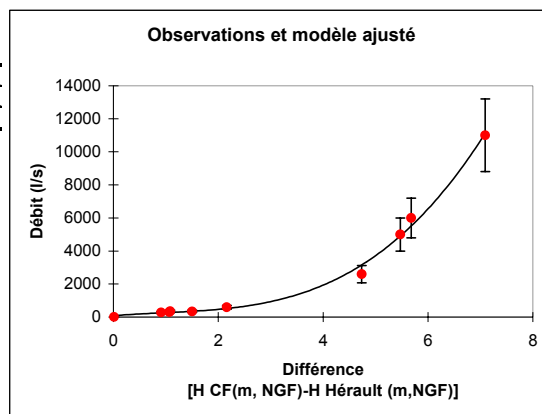
R (coefficient de corrélation)	0.998
R ² (coefficient de détermination)	0.995
SCR	592088.265

Paramètres du modèle :

Paramètres	Valeur	Ecart-type
pr1	82.103	294.322
pr2	268.174	380.519
pr3	-123.754	118.457
pr4	43.093	10.646

Prédictions et résidus :

Individus	Poids	X	Y	Y (Modèle)	Résidus	Résidus centrés-réduits
Ind1	1	0.010	10.000	84.772	-74.772	-0.238
Ind2	1	0.909	280.000	255.923	24.077	0.077
Ind3	1	1.066	300.000	279.572	20.428	0.065
Ind4	1	1.081	348.000	281.860	66.140	0.211
Ind5	1	1.500	345.000	351.356	-6.356	-0.020
Ind6	1	2.160	590.000	518.249	71.751	0.228
Ind7	1	4.737	2600.000	3155.206	-555.206	-1.767
Ind8	1	5.471	5000.000	4903.219	96.781	0.308
Ind9	1	5.680	6000.000	5509.543	490.457	1.561
Ind10	1	7.092	11000.000	11133.300	-133.300	-0.424



Relation utilisée pour estimer le niveau de l'Hérault à partir du débit des Cent Fonts.

Résumé pour la variable dépendante :

Variable Y	Nbre de valeurs	Moyenne	Ecart-type
H Hérault	10	77.042	1.033

Résumé pour les variables quantitatives :

Variable X	Moyenne	Ecart-type
Q Cent Fonts	2647.3	3642.9

Résultats pour le modèle ajusté :

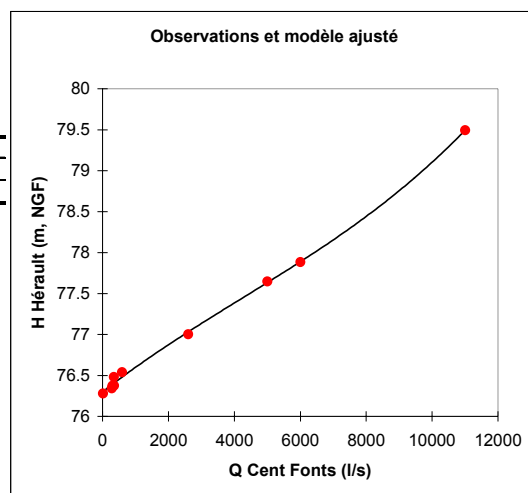
Modèle	R ²	SCR
$pr1 + pr2 \cdot X1^1 + pr3 \cdot X1^2 + pr4 \cdot X1^3$		
$76.3 + 3.133E-04 \cdot X1^1 - 1.531E-08 \cdot X1^2 + 1.2021E-12 \cdot X1^3$	0.999	0.014

Coefficients d'ajustement :

R (coefficient de corrélation)	0.999
R ² (coefficient de détermination)	0.999
SCR	0.014

Paramètres du modèle :

Paramètres	Valeur	Ecart-type
pr1	7.63E+01	2.7E-02
pr2	3.13E-04	5.2E-05
pr3	-1.53E-08	1.4E-08
pr4	1.20E-12	8.4E-13



Prédictions et résidus :

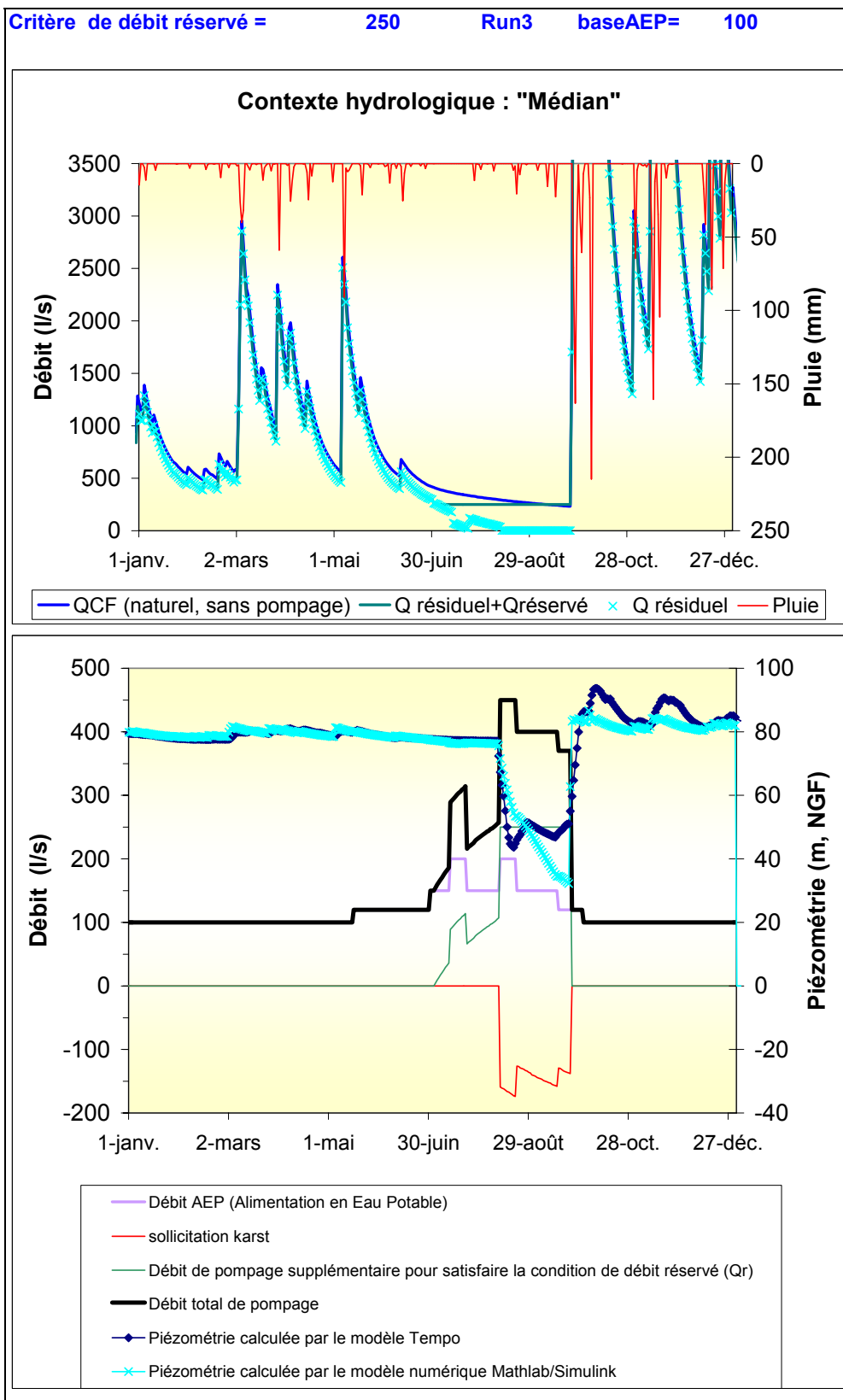
Individus	Poids	Q estimé	H Hérault	H Hérault (Modèle)	Résidus	Résidus centrés- réduits
Ind1	1	10	76.28	76.30	-0.023	-0.476
Ind2	1	280	76.34	76.39	-0.043	-0.888
Ind3	1	300	76.37	76.39	-0.019	-0.386
Ind4	1	348	76.38	76.41	-0.030	-0.634
Ind5	1	345	76.48	76.41	0.074	1.540
Ind6	1	590	76.54	76.48	0.060	1.259
Ind7	1	2600	77.00	77.03	-0.030	-0.626
Ind8	1	5000	77.65	77.63	0.014	0.286
Ind9	1	6000	77.89	77.89	-0.003	-0.066
Ind10	1	11000	79.49	79.49	0.000	-0.008

Annexe 4

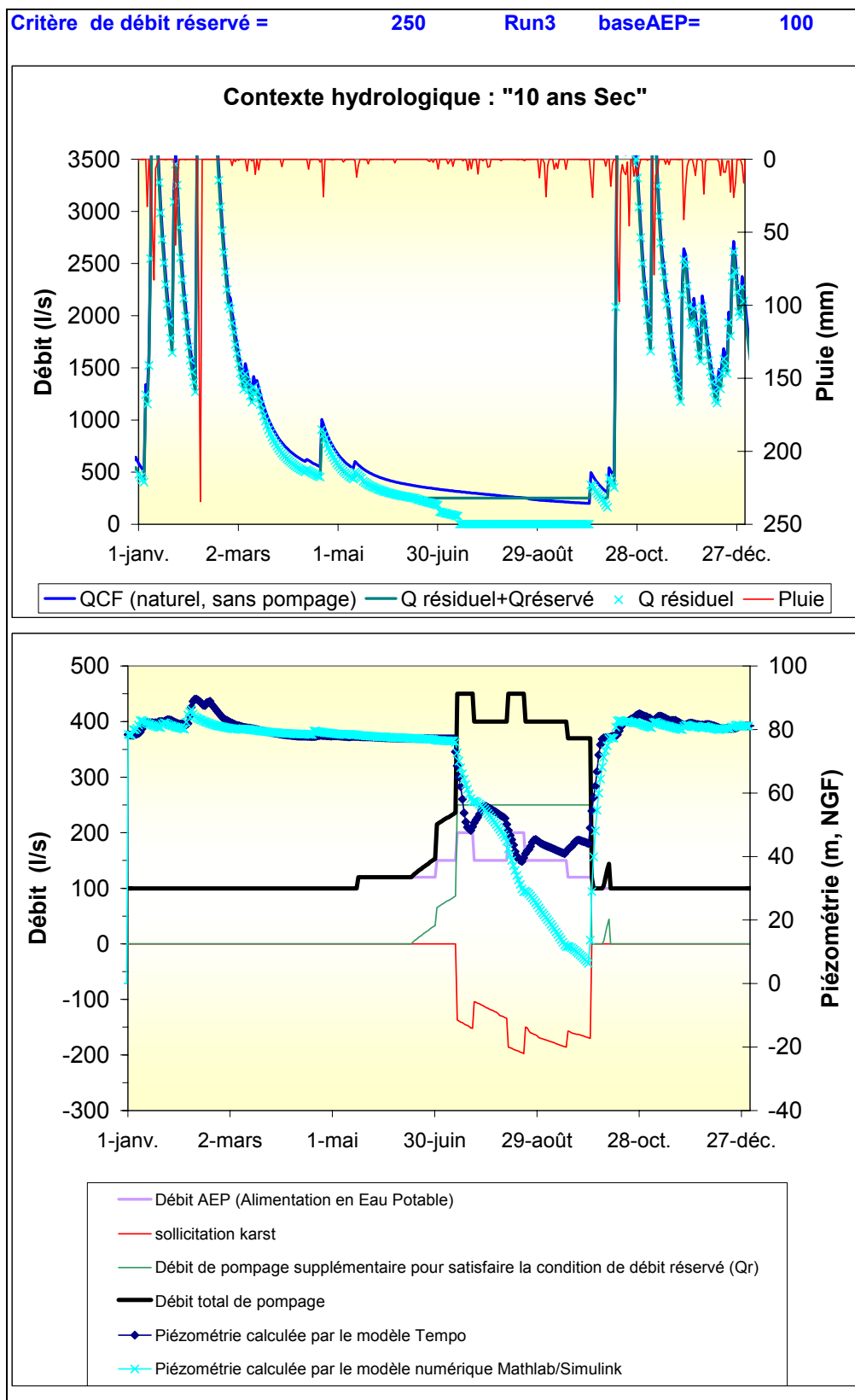
Résultats de l'approche de modélisation Tempo et comparaison aux résultats du modèle de réservoir couplé à une solution analytique.

		run 3			run 3				run 3										
Qrestitué (l/s)=		200							250										
QAEP_base (l/s)		100	pointe =	200					100	pointe =	200							200	
contexte Hydro (probabilité d'occurrence)																			
Cycle		Date piézo mini	Piézo mini	QCF l/s	Sollicitat° l/s	Pompaje l/s	Date piézo mini	Piézo mini	QCF l/s	Sollicitat° l/s	Pompaje l/s	Date piézo mini	Piézo mini	QCF l/s	Sollicitat° l/s				Pompaje l/s
2005-2006	30 ans Sec	20/08/06	44.74	226	-174	400	20/08/06	34.17	226	-224	450	20/08/06	23.60	226	-274				500
2006-2007	>30 ans Sec	20/08/07	34.27	184	-216	400	20/08/07	23.70	184	-266	450	20/08/07	13.13	184	-316				500
2007-2008	10 ans H	19/08/08	45.16	235	-165	400	19/08/08	34.59	235	-215	450	19/08/08	24.02	235	-265				500
2008-2009	20 ans S	21/08/09	77.69	619	0	200	21/08/09	77.69	619	0	200	21/08/09	77.69	619	0				200
2009-2010	médiane	20/08/10	54.23	277	-123	400	20/08/10	43.67	277	-173	450	20/08/10	33.10	277	-223				500
2010-2011	4 ans Hum	21/08/11	77.04	308	0	292	20/08/11	50.20	309	-141	450	20/08/11	39.64	309	-191				500
2011-2012	10 ans Hum	20/08/12	77.07	326	0	274	20/08/12	77.07	326	0	324	19/08/12	43.72	327	-173				500
2012-2013	10 ans S	20/08/13	46.71	243	-157	400	20/08/13	36.14	243	-207	450	20/08/13	25.57	243	-257				500
2013-2014	10 ans S	20/08/14	49.00	254	-146	400	20/08/14	38.43	254	-196	450	20/08/14	27.86	254	-246				500
2014-2015	20 ans S	20/08/15	45.94	233	-167	400	20/08/15	35.37	233	-217	450	20/08/15	24.80	233	-267				500
		run 3					run 3					run 3							
Qrestitué (l/s)=		200					250					300							
QAEP_base (l/s)		125	pointe =	250			125	pointe =	250			125	pointe =	250					
contexte Hydro (probabilité d'occurrence)																			
Cycle		Date piézo mini	Piézo mini	QCF l/s	Sollicitat° l/s	Pompaje l/s	Date piézo mini	Piézo mini	QCF l/s	Sollicitat° l/s	Pompaje l/s	Date piézo mini	Piézo mini	QCF l/s	Sollicitat° l/s				Pompaje l/s
2005-2006	30 ans Sec	20/08/06	35.18	226	-224	450	20/08/06	24.61	226	-274	500	21/08/06	13.05	222	-328				550
2006-2007	>30 ans Sec	21/08/07	23.70	184	-266	450	21/08/07	13.13	184	-316	500	21/08/07	2.56	184	-366				550
2007-2008	20 ans S	20/08/08	34.59	234	-216	450	20/08/08	24.02	234	-266	500	20/08/08	13.45	234	-316				550
2008-2009	20 ans H	21/08/09	77.69	405	0	295	21/08/09	77.69	619	0	250	21/08/09	77.69	619	0				250
2009-2010	médiane	21/08/10	43.66	276	-174	450	21/08/10	33.09	276	-224	500	21/08/10	22.53	276	-274				550
2010-2011	4 ans Hum	22/07/11	77.15	356	0	344	21/08/11	39.63	308	-192	500	21/08/11	29.06	308	-242				550
2011-2012	10 ans Hum	20/08/12	54.28	326	-124	450	20/08/12	43.71	326	-174	500	20/08/12	33.14	326	-224				550
2012-2013	10 ans S	21/08/13	36.14	240	-210	450	21/08/13	25.57	240	-260	500	21/08/13	15.00	240	-310				550
2013-2014	10 ans S	21/08/14	38.43	252	-198	450	21/08/14	27.86	252	-248	500	21/08/14	17.29	252	-298				550
2014-2015	20 ans S	21/08/15	35.36	230	-220	450	21/08/15	24.79	230	-270	500	21/08/15	14.22	230	-320				550

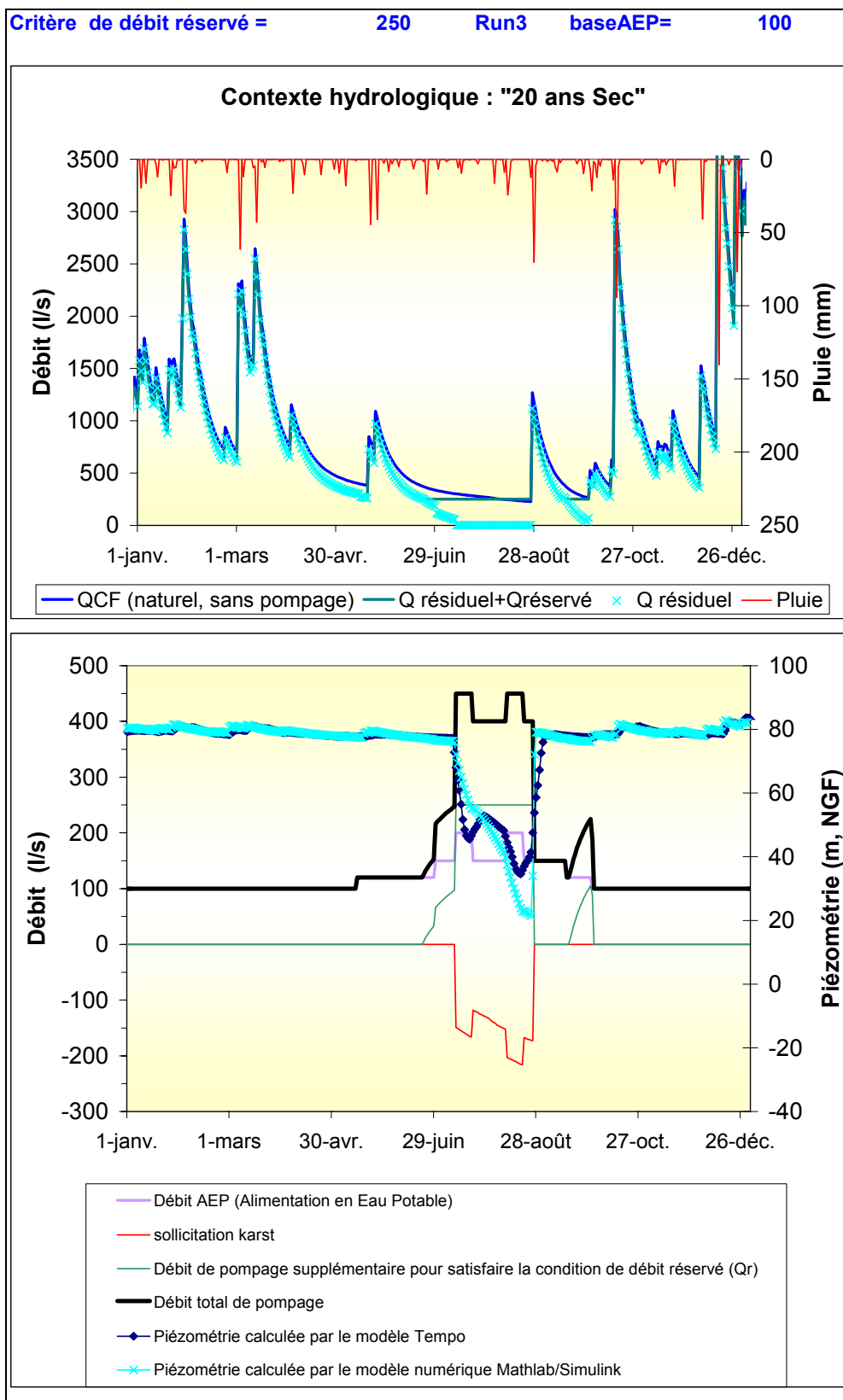
		run 3				run 3									
Qrestitué (l/s)=		200				250				300					
QAEP_base (l/s)		150		pointe =		150		pointe =		150		pointe =		300	
contexte Hydro (probabilité d'occurrence)		Date piézo mini		Piézo mini		Date piézo mini		Piézo mini		Date piézo mini		Piézo mini		Pompage l/s	
Cycle		21/08/06		23.62		21/8/06		13.05		21/08/06		-6.04		222	
2005-2006	30 ans Sec	21/08/07		13.13		21/8/07		2.56		21/08/07		-15.85		184	
2006-2007	>30 ans Sec	20/08/08		24.02		20/8/08		13.45		20/08/08		-5.00		234	
2007-2008	20 ans S	21/08/09		77.69		21/8/09		77.69		21/08/09		77.69		619	
2008-2009	20 ans H													0	
2009-2010	médiane	21/08/10		33.09		21/8/10		22.53		21/08/10		4.00		276	
2010-2011	4 ans Hum	21/08/11		39.63		21/8/11		29.06		21/08/11		10.62		308	
2011-2012	10 ans Hum	20/08/12		43.71		14/9/12		39.89		20/08/12		14.61		326	
2012-2013	10 ans S	21/08/13		25.57		21/8/13		15.00		21/08/13		-3.49		240	
2013-2014	10 ans S	21/08/14		27.86		21/8/14		17.29		21/08/14		-1.18		252	
2014-2015	20 ans S	21/08/15		24.79		21/8/15		14.22		21/08/15		-4.68		230	
		run 3				run 3				run 3					
Qrestitué (l/s)=		200				250				300					
QAEP_base (l/s)		200		pointe =		200		pointe =		200		pointe =		400	
contexte Hydro (probabilité d'occurrence)		Date piézo mini		Piézo mini		Date piézo mini		Piézo mini		Date piézo mini		Piézo mini		Pompage	
Cycle		21/08/06		4.53		21/8/06		-6.04		21/8/06		-428		650	
2005-2006	30 ans Sec	21/08/07		-5.28		21/8/07		-15.85		21/8/07		-466		650	
2006-2007	>30 ans Sec	20/08/08		5.57		20/8/08		-5.00		20/8/08		-416		650	
2007-2008	20 ans S	21/08/09		77.69		21/8/09		77.69		21/8/09		0		431	
2008-2009	20 ans H														
2009-2010	médiane	21/08/10		14.57		21/8/10		4.00		21/8/10		-374		650	
2010-2011	4 ans Hum	21/08/11		21.19		21/8/11		10.62		21/8/11		-342		650	
2011-2012	10 ans Hum	20/08/12		25.18		20/8/12		14.61		20/8/12		-324		650	
2012-2013	10 ans S	21/08/13		7.08		21/8/13		-3.49		21/8/13		-410		650	
2013-2014	10 ans S	21/08/14		9.39		21/8/14		-1.18		21/8/14					
2014-2015	20 ans S	21/08/15		5.89		21/8/15		-4.68		21/8/15					



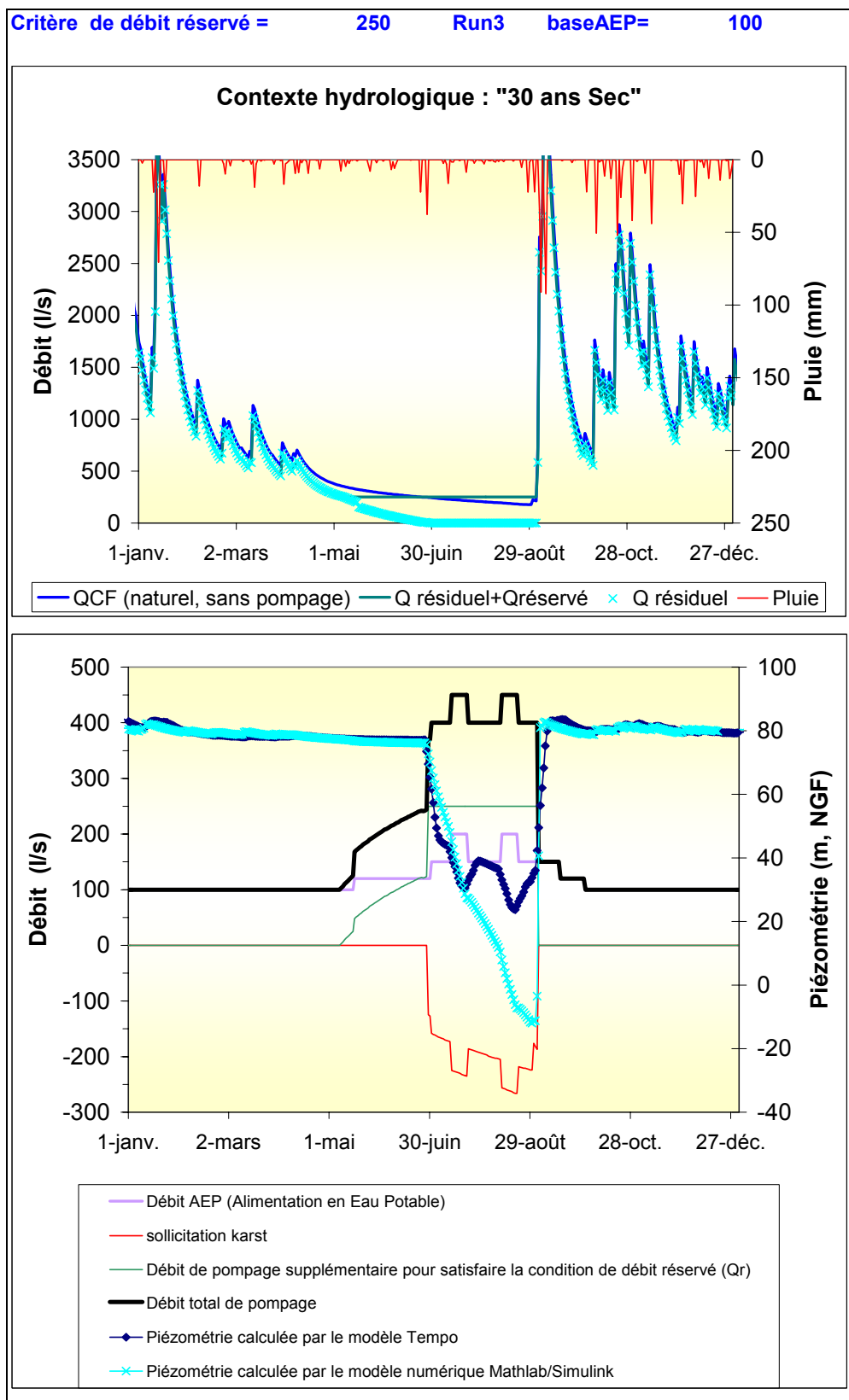
Annexe_Illustration 10. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



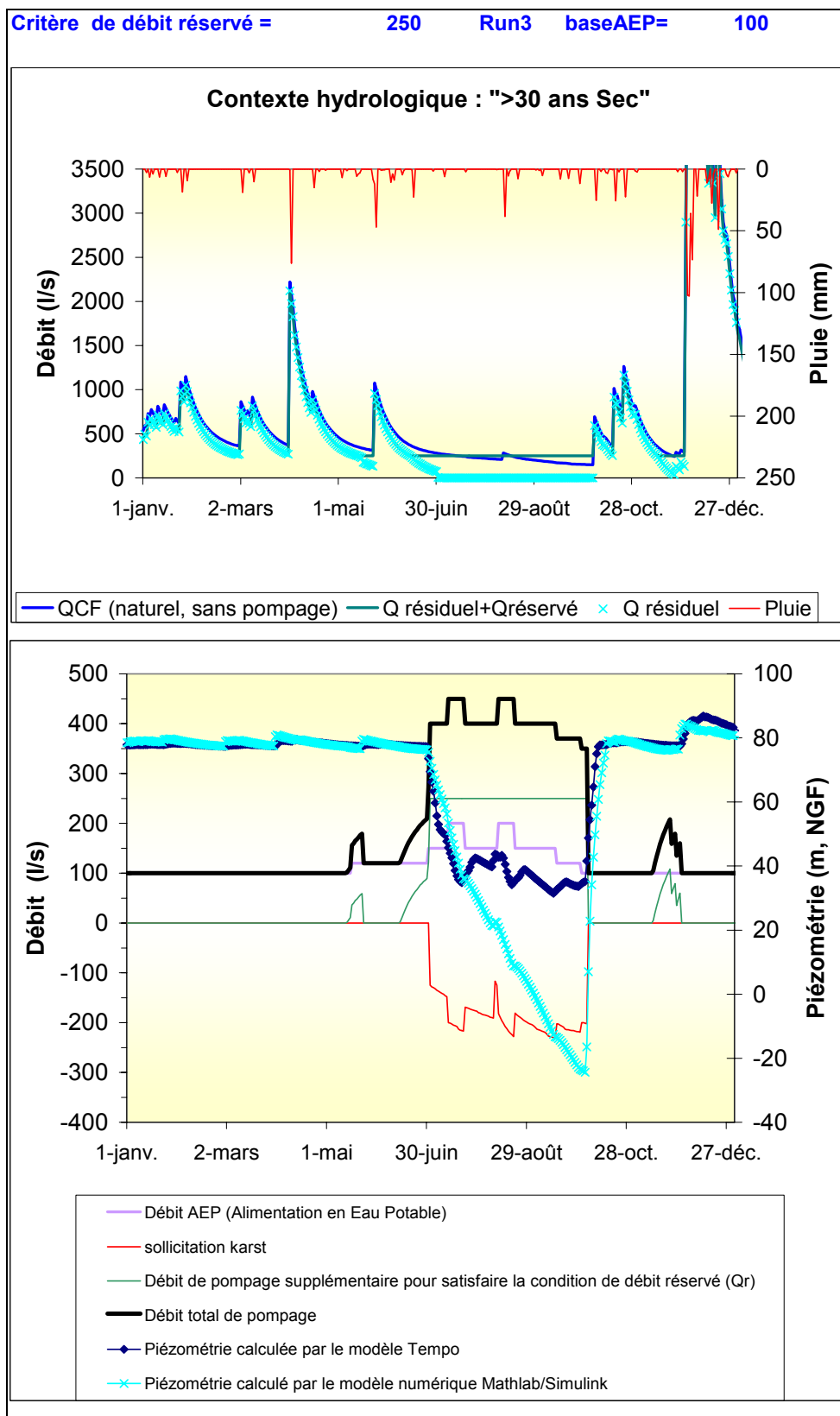
Annexe_Illustration 11. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans sec » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



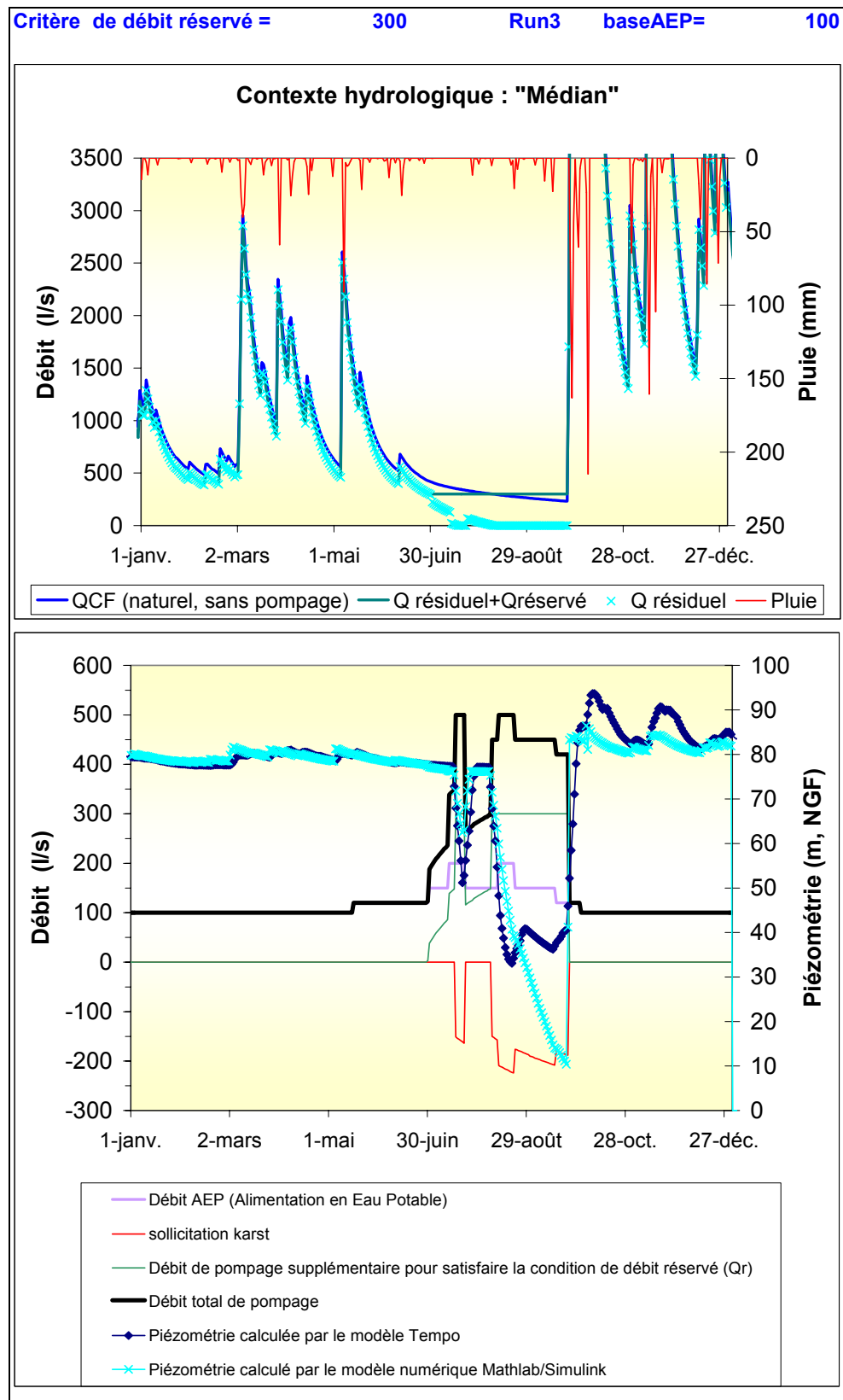
Annexe_Illustration 12. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 20 ans sec » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



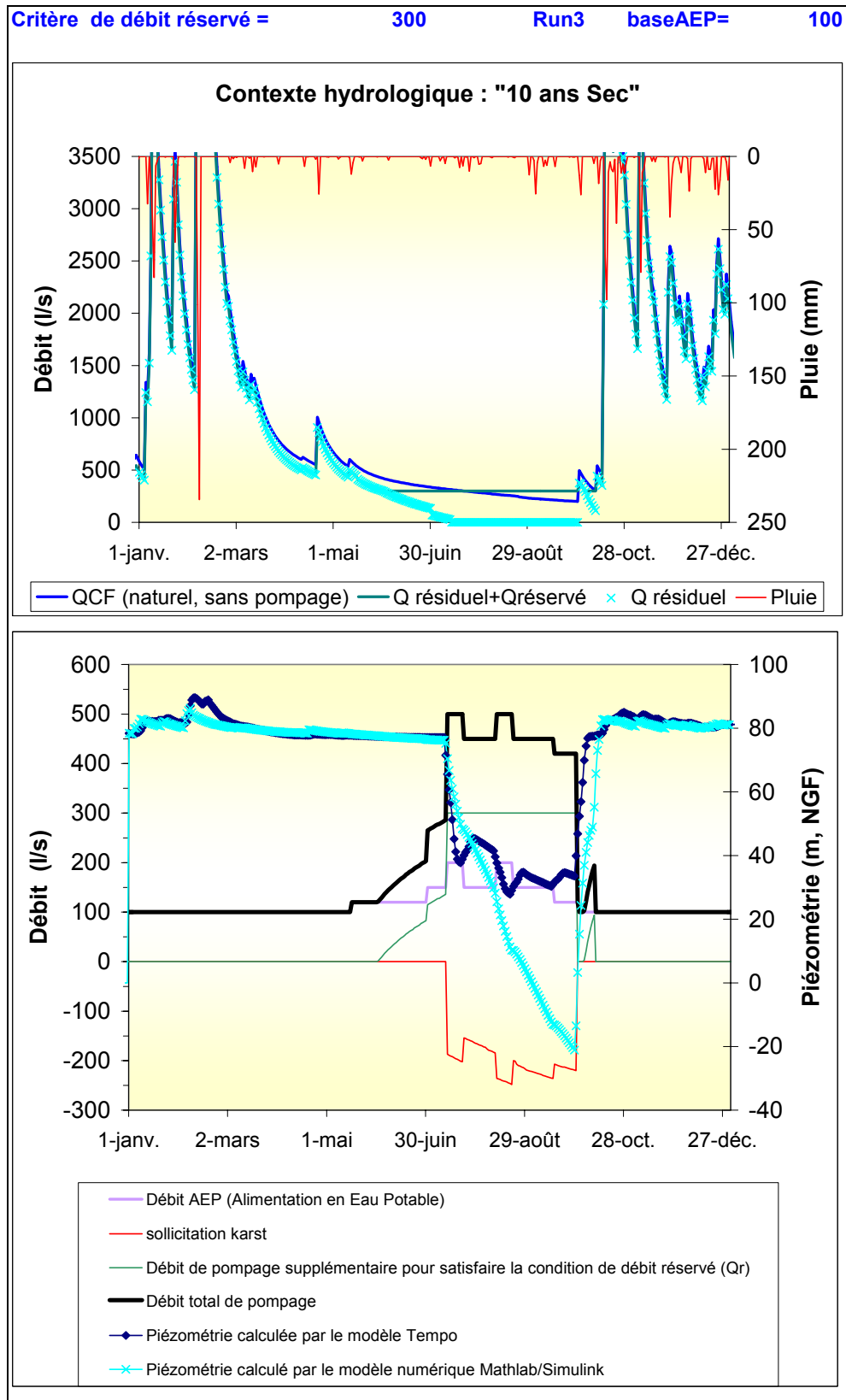
Annexe_Illustration 13. Evolution temporelle de la piézométrie calculé par les modèles en contexte hydrologique de type « 30 ans sec » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



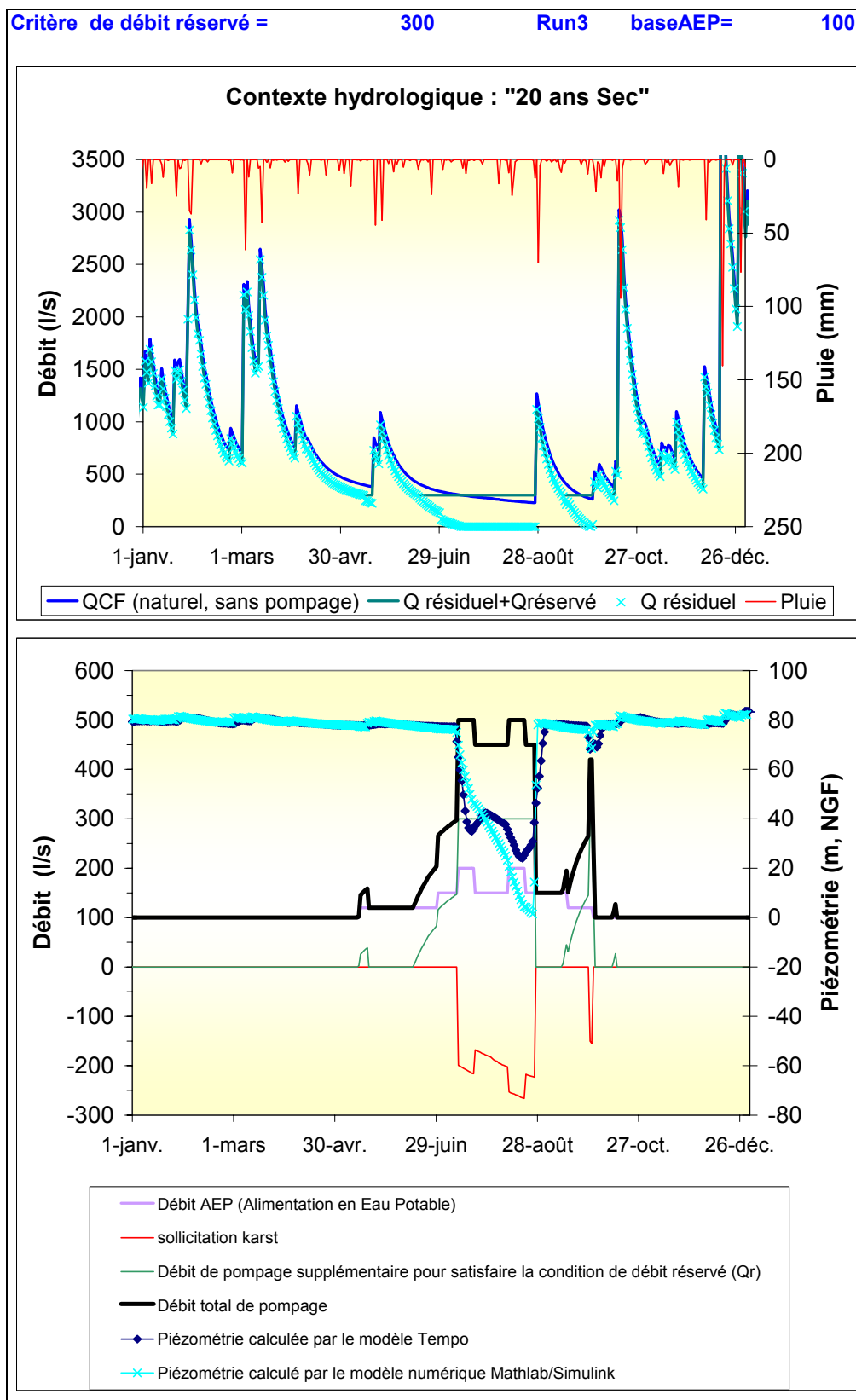
Annexe_Illustration 14. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « >30 ans sec» (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



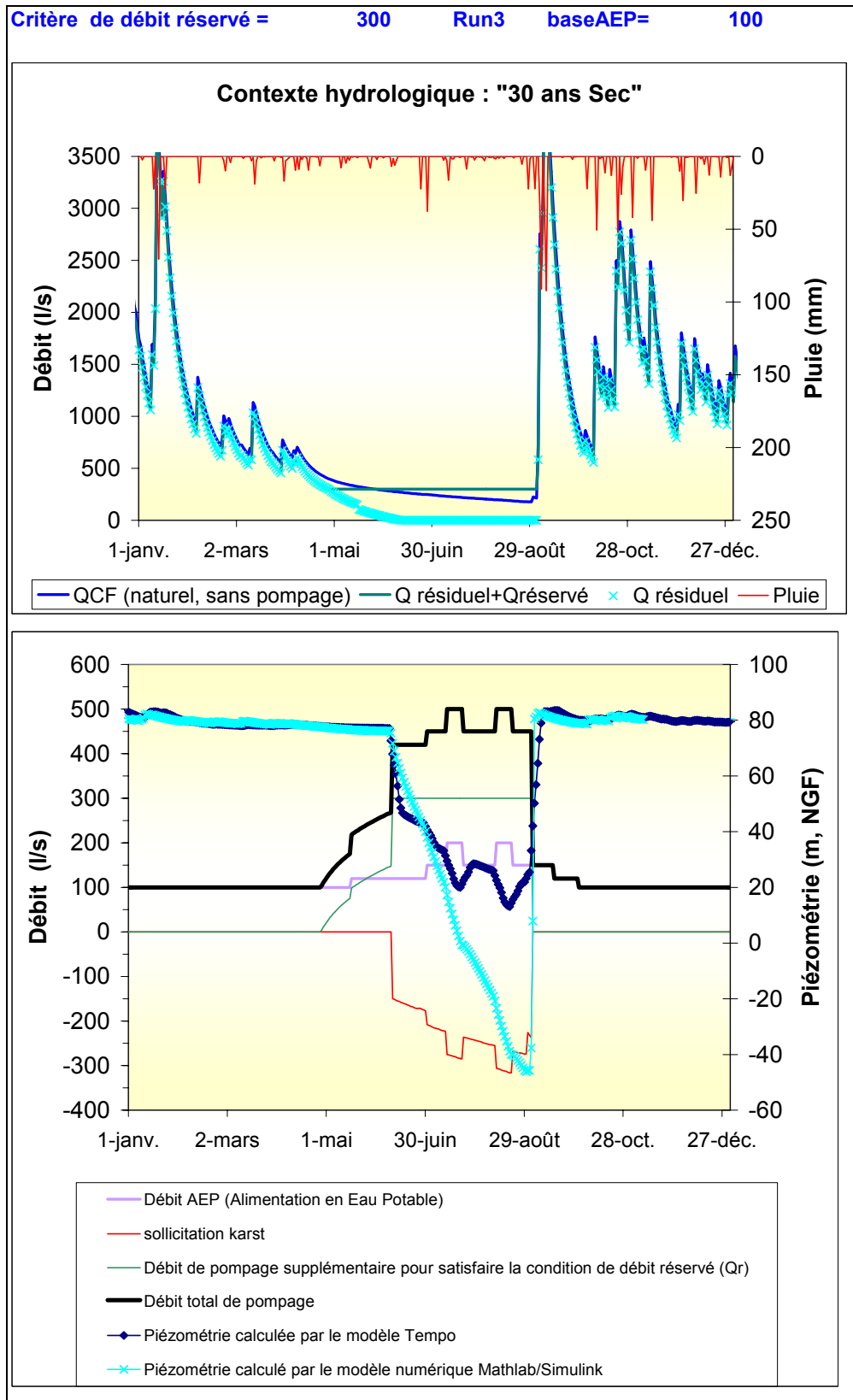
Annexe_Illustration 15. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 300 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



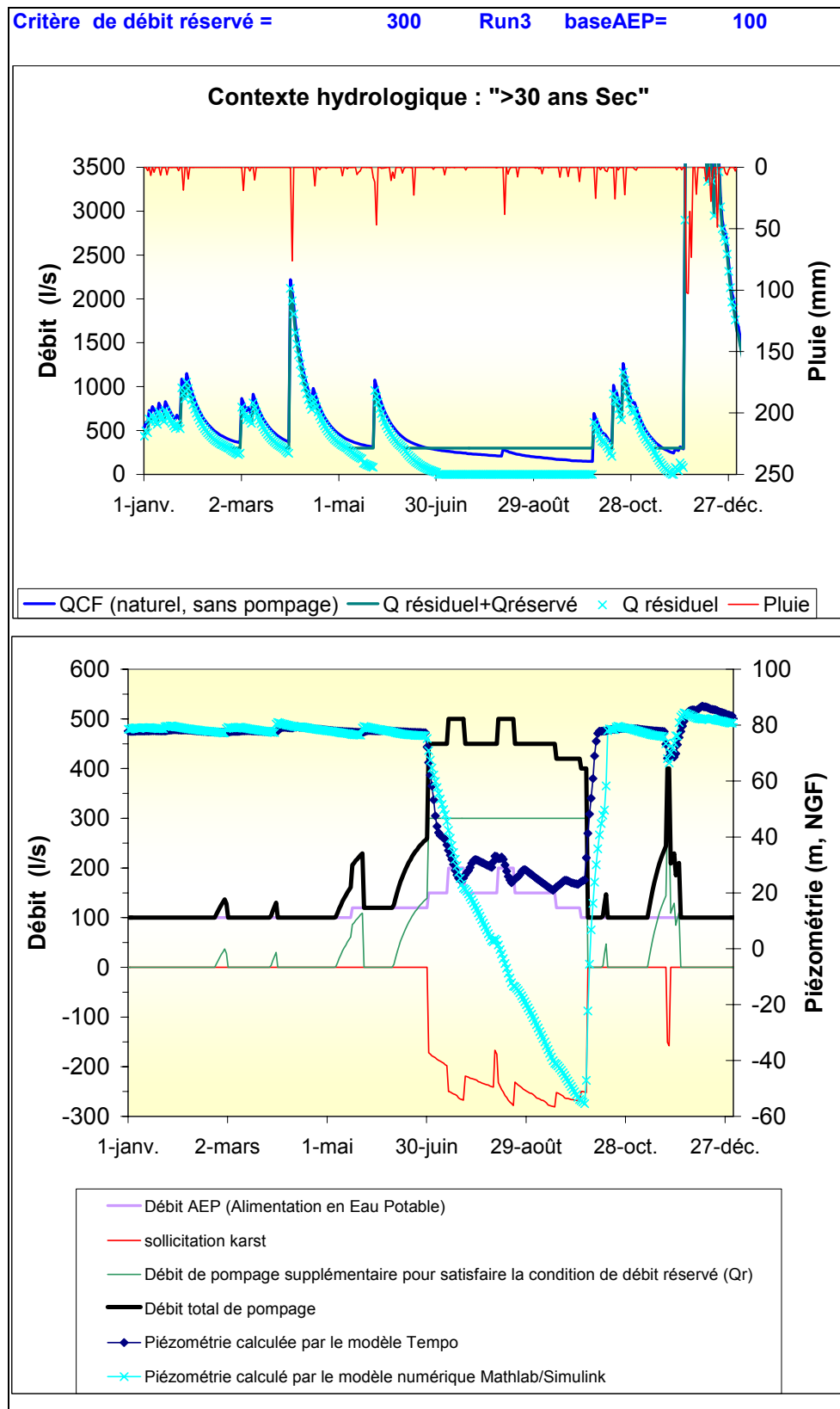
Annexe_Illustration 16. Evolution temporelle de la piézométrie calculé par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans sec» (Scénario : Qréservée = 300 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



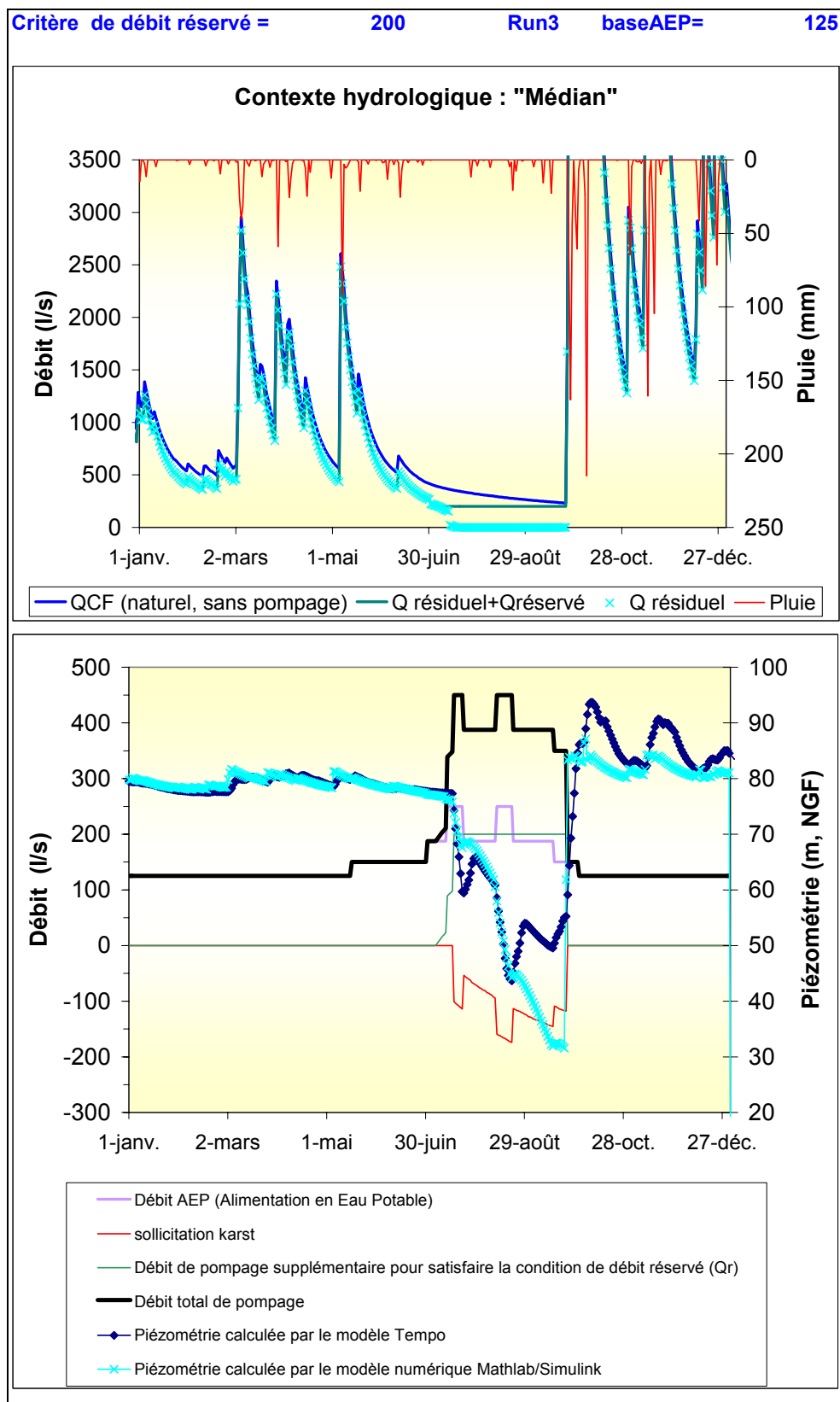
Annexe_Illustration 17. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 20 ans sec » (Scénario : Qréservé = 300 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



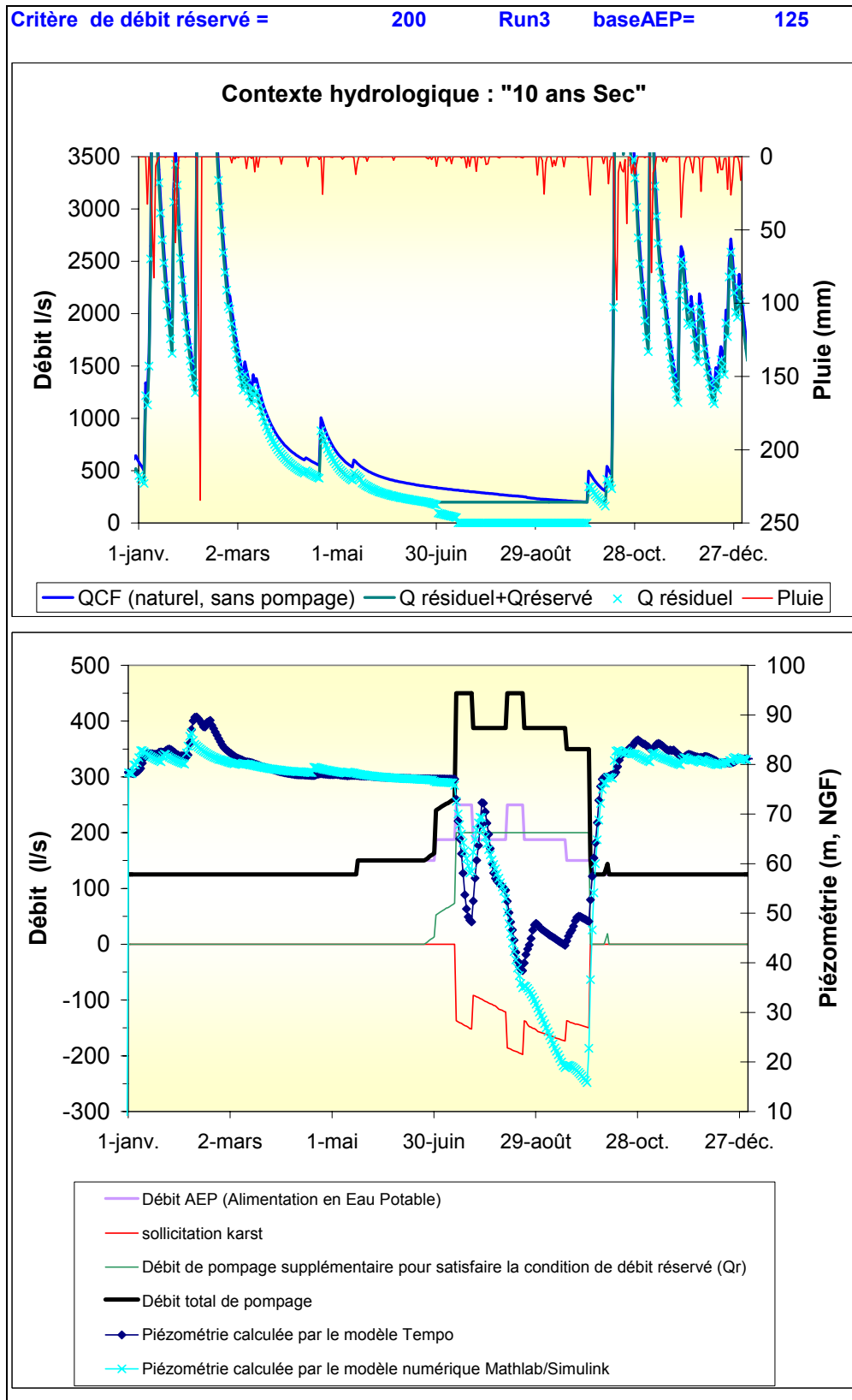
Annexe_Illustration 18. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 30 ans sec » (Scénario : Qréservé = 300 l/s, Qbase AEP = 100 l/s)



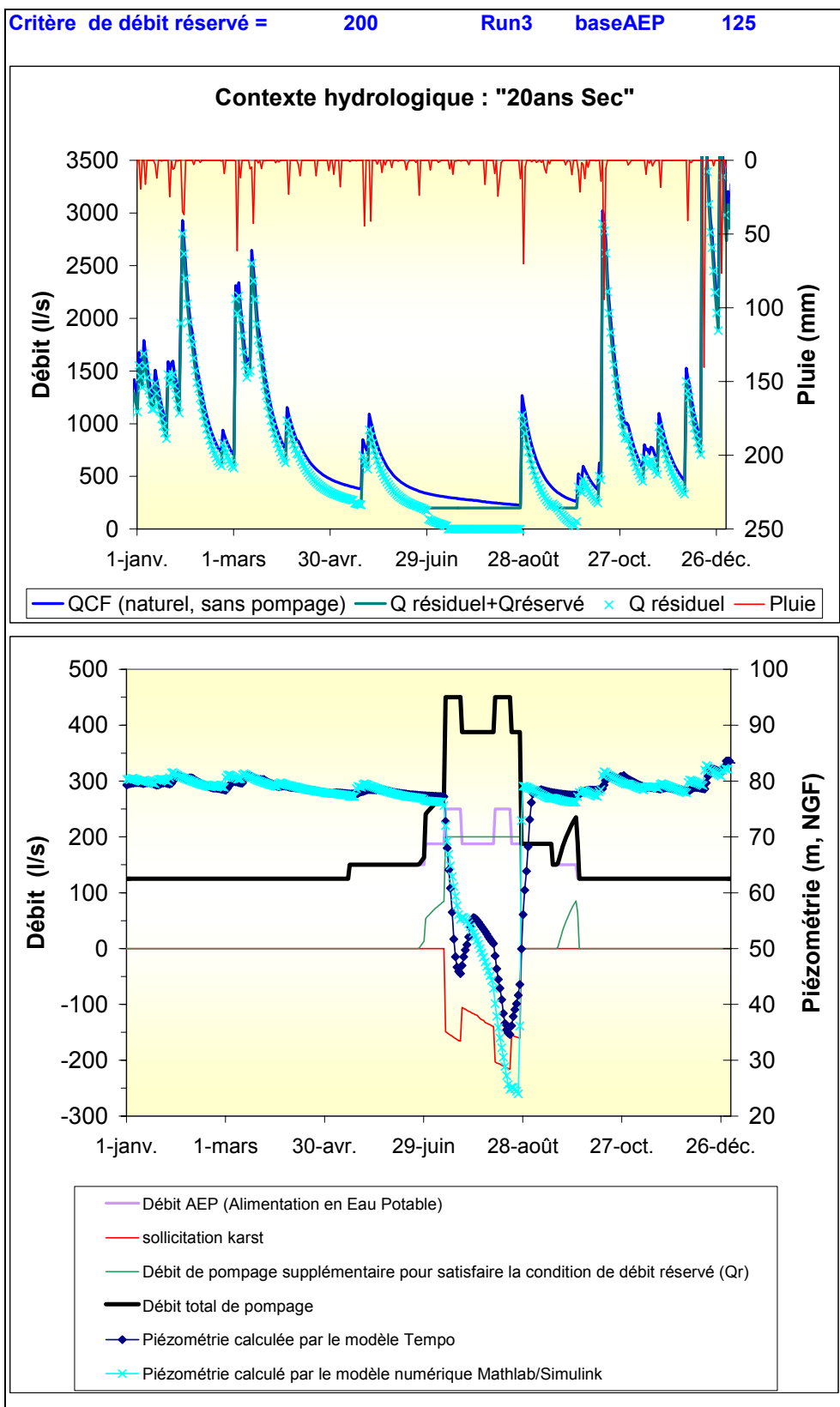
Annexe_Illustration 19. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « >30 ans sec» (Scénario : Q réservé = 300 l/s, Q base AEP = 100 l/s)



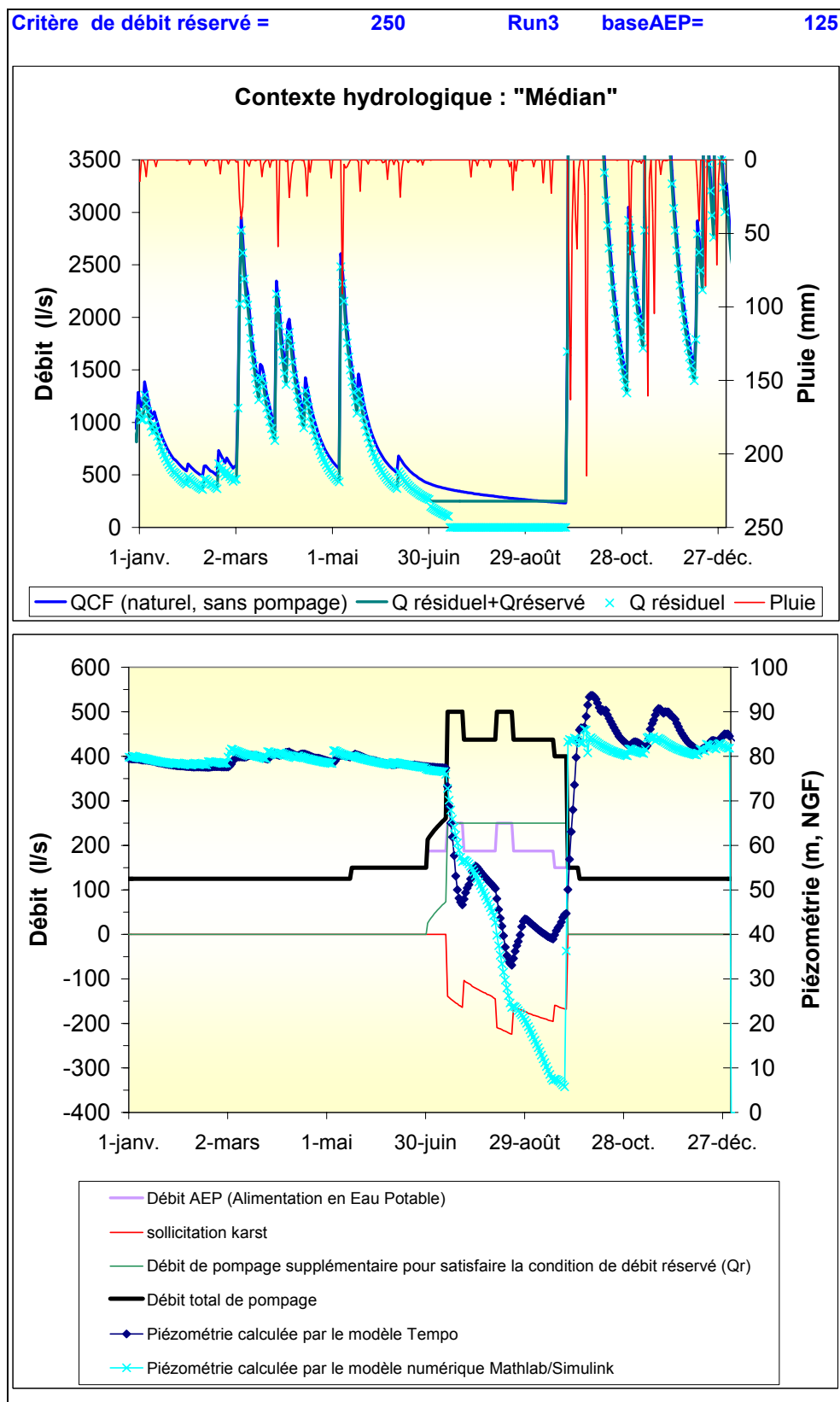
Annexe_Illustration 20. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



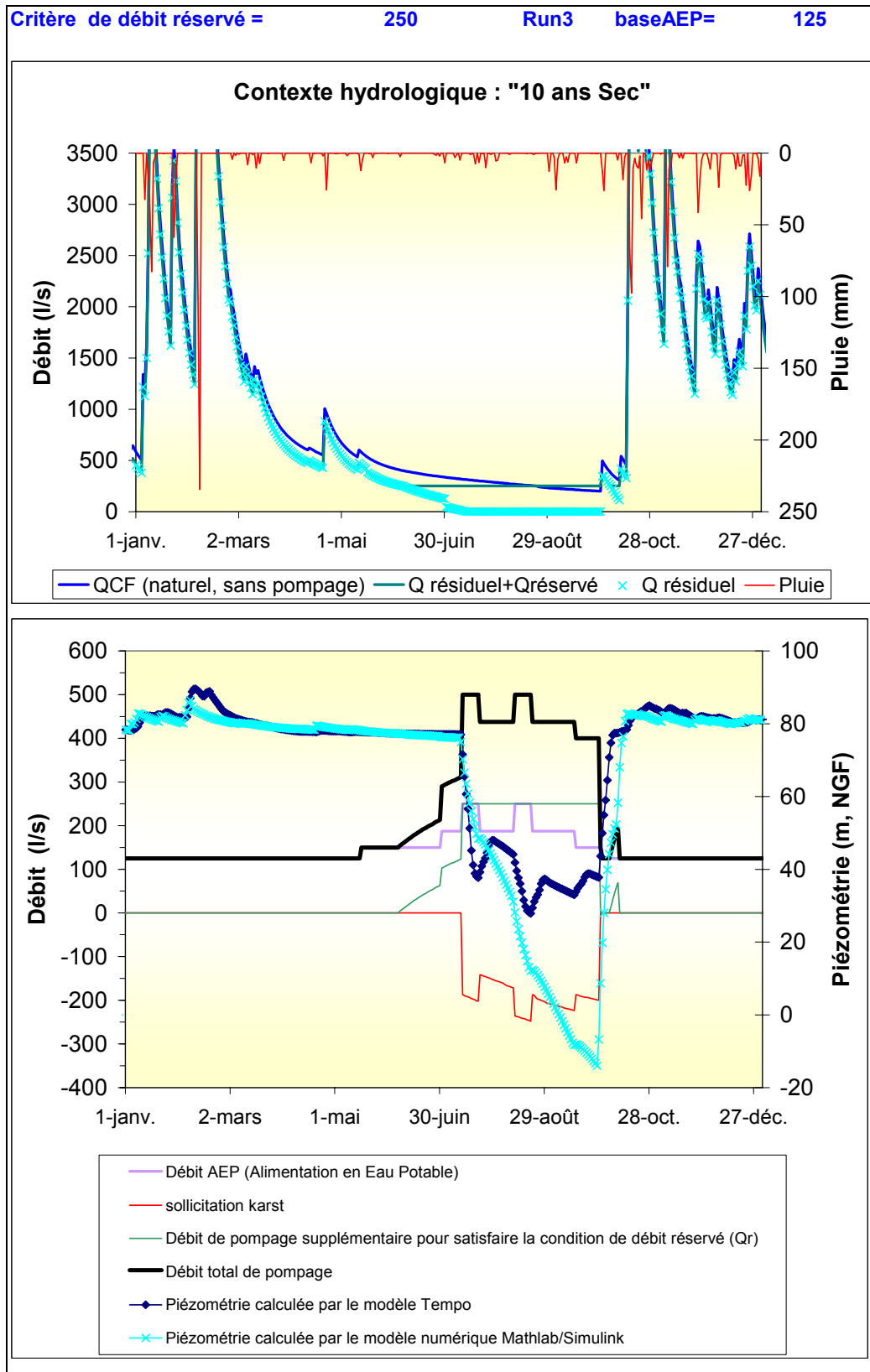
Annexe_Illustration 21. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans sec » (Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



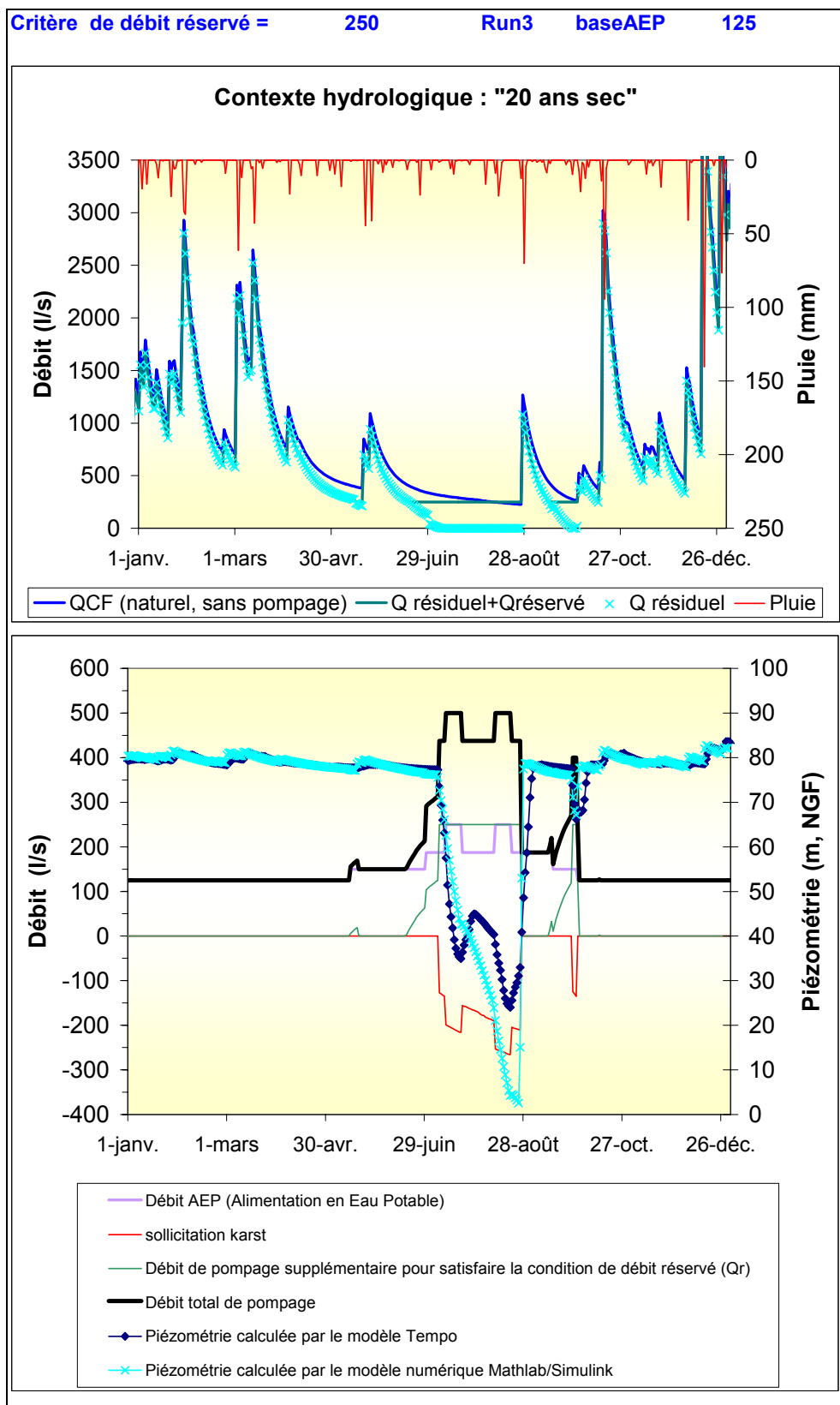
Annexe_Illustration 22. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 20 ans sec » (Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



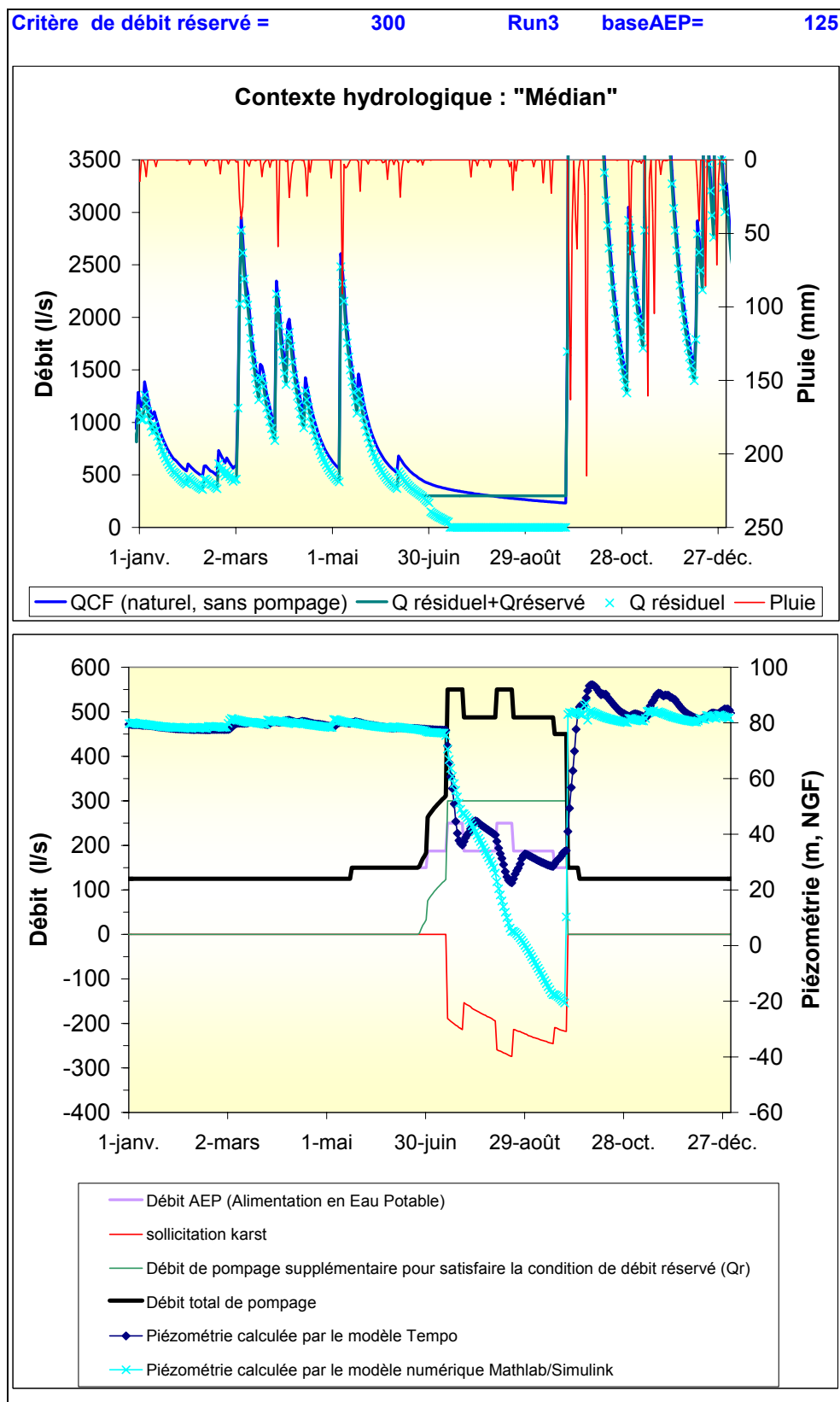
Annexe_Illustration 23. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



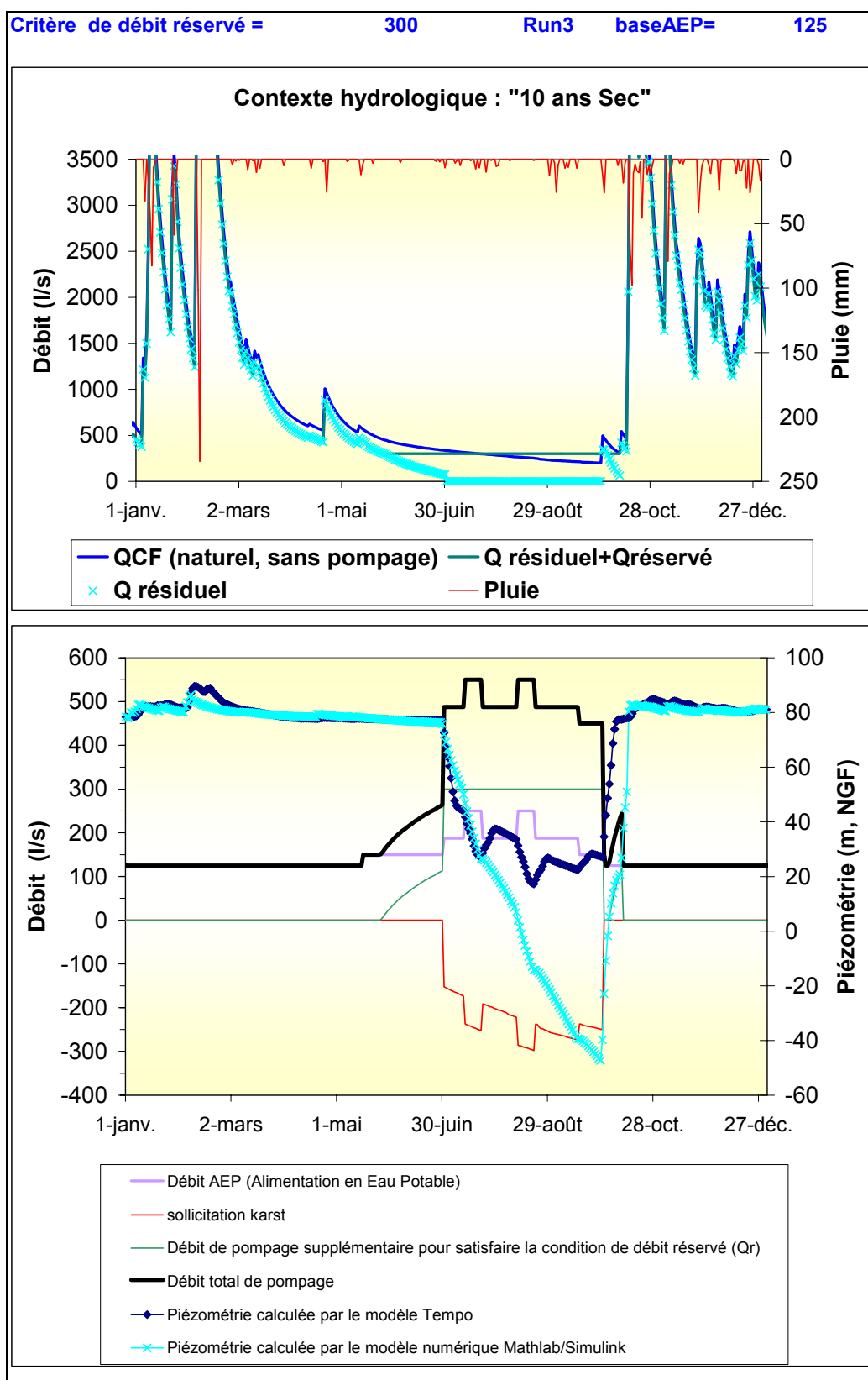
Annexe_Illustration 24. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans sec » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



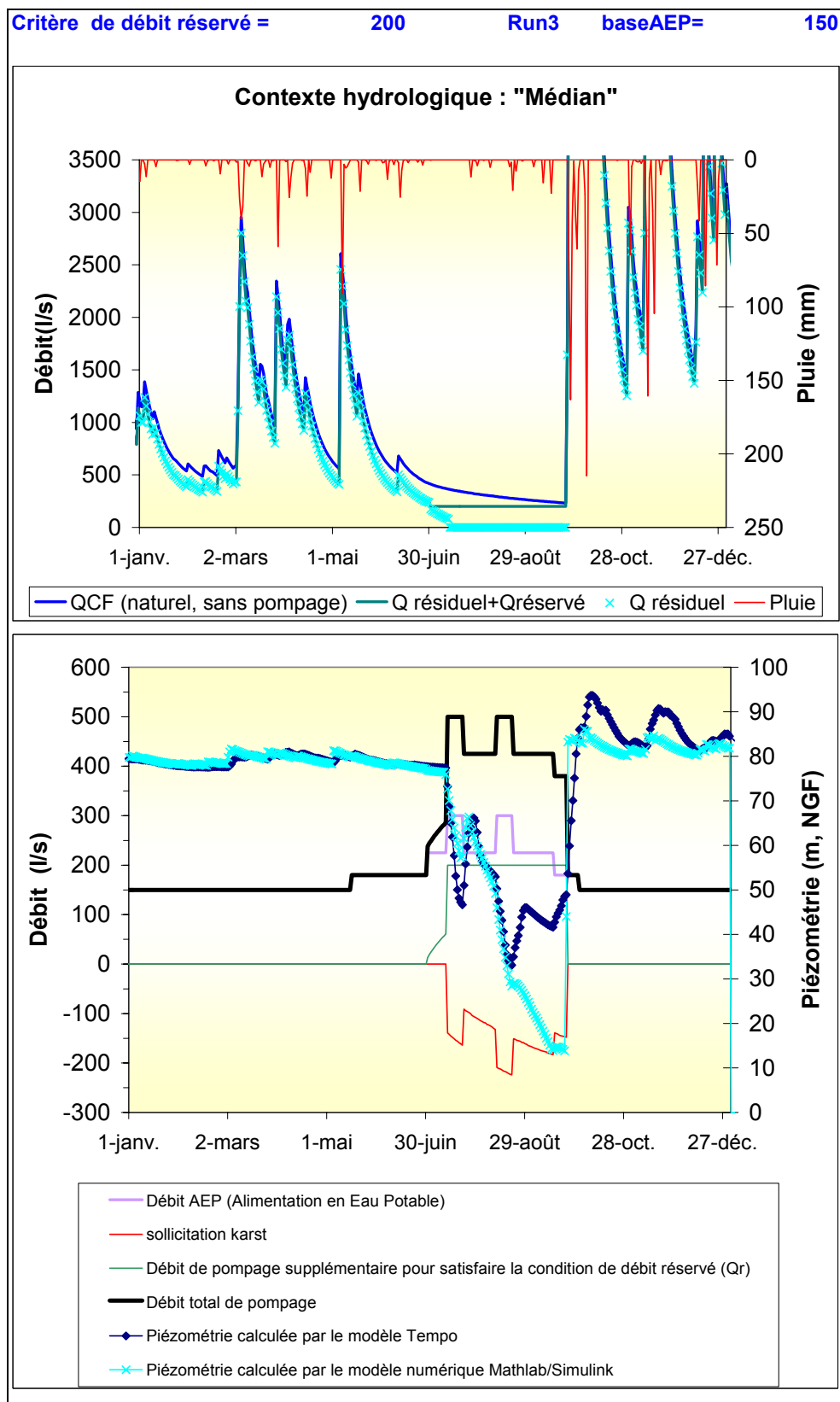
Annexe_Illustration 25. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 20 ans sec » (Scénario : Qréservé = 250 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



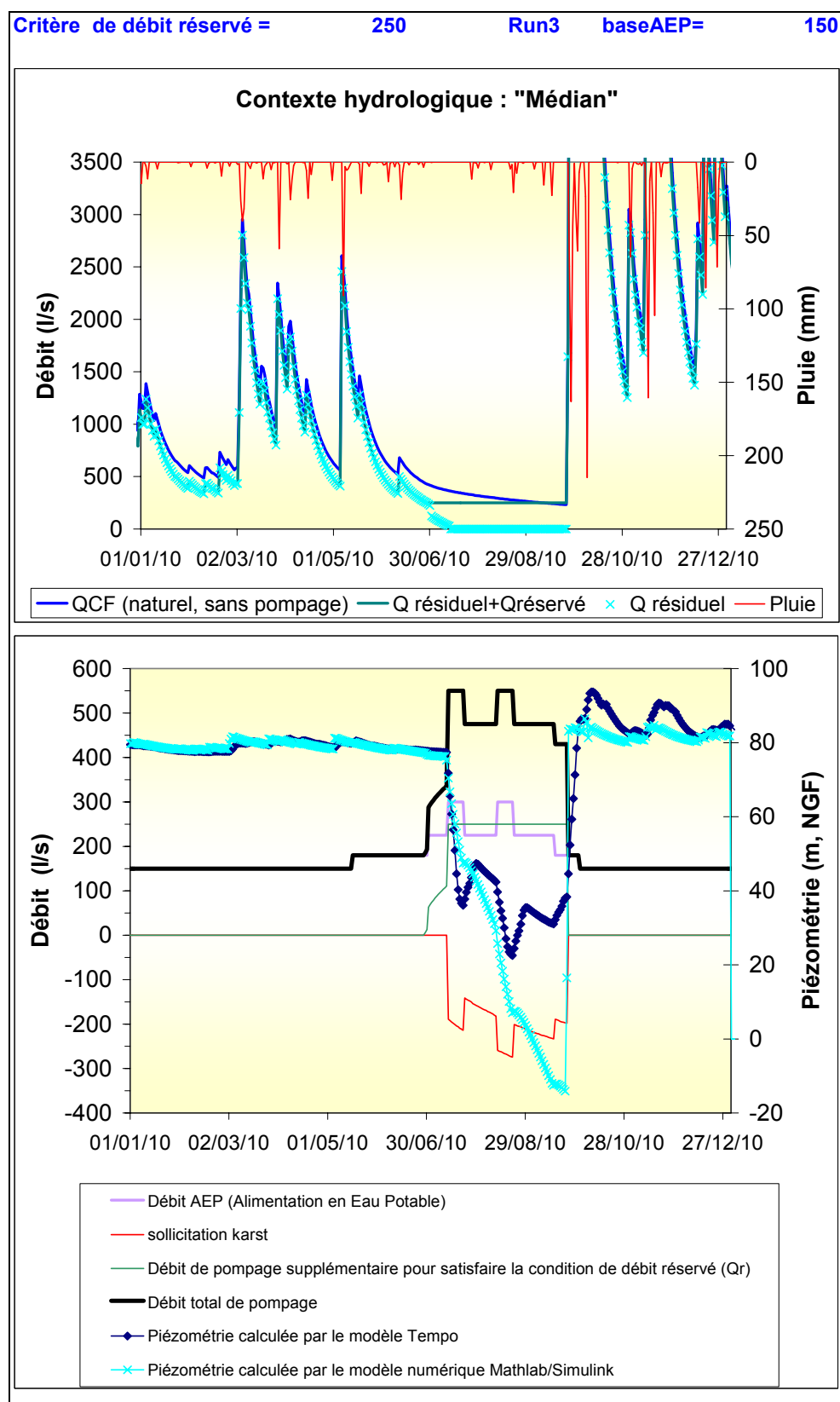
Annexe_Illustration 26. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 300 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



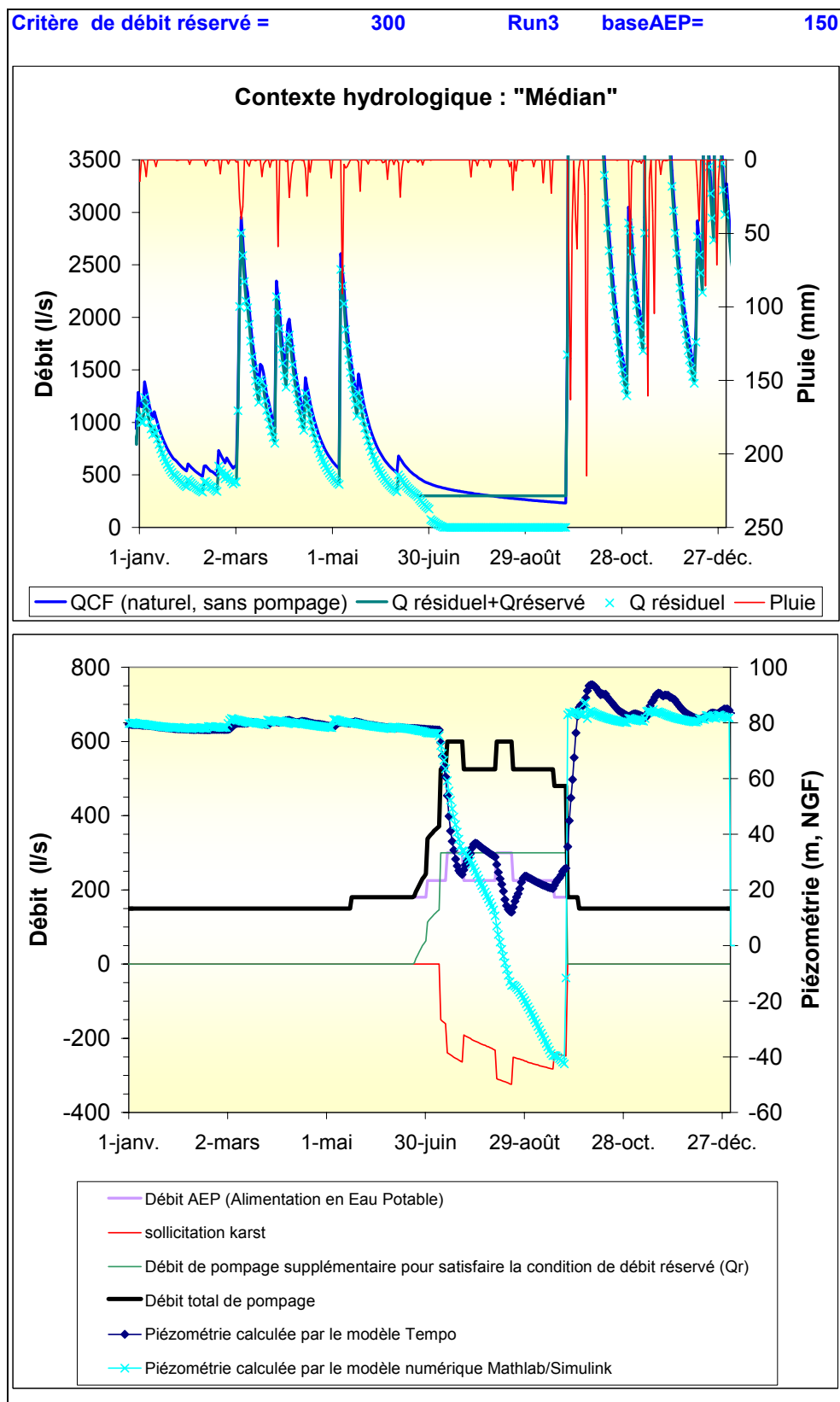
Annexe_Illustration 27. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « 10 ans Sec» (Scénario : Qréservé = 300 l/s, Qbase AEP = 125 l/s)



Annexe_Illustration 28. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 200 l/s, Qbase AEP = 150 l/s)



Annexe_Illustration 29. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Q réservé = 250 l/s, Q base AEP = 150 l/s)



Annexe_Illustration 30. Evolution temporelle de la piézométrie calculée par les modèles en contexte hydrologique de type « d'année médiane » (Scénario : Qréservé = 300 l/s, Qbase AEP = 150 l/s)

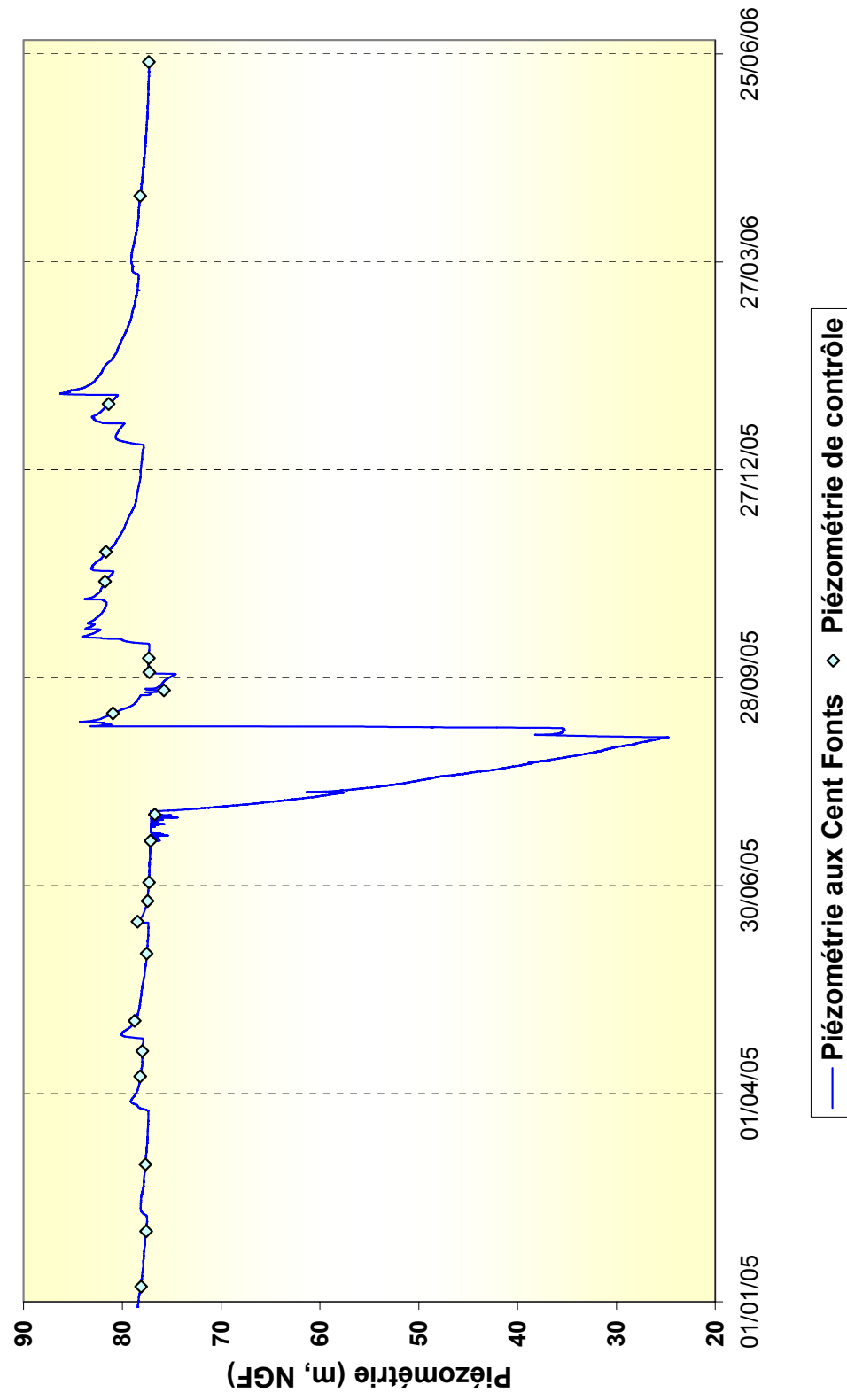
Annexe 5

Eléments complémentaires de l'étude Hydrobiologique

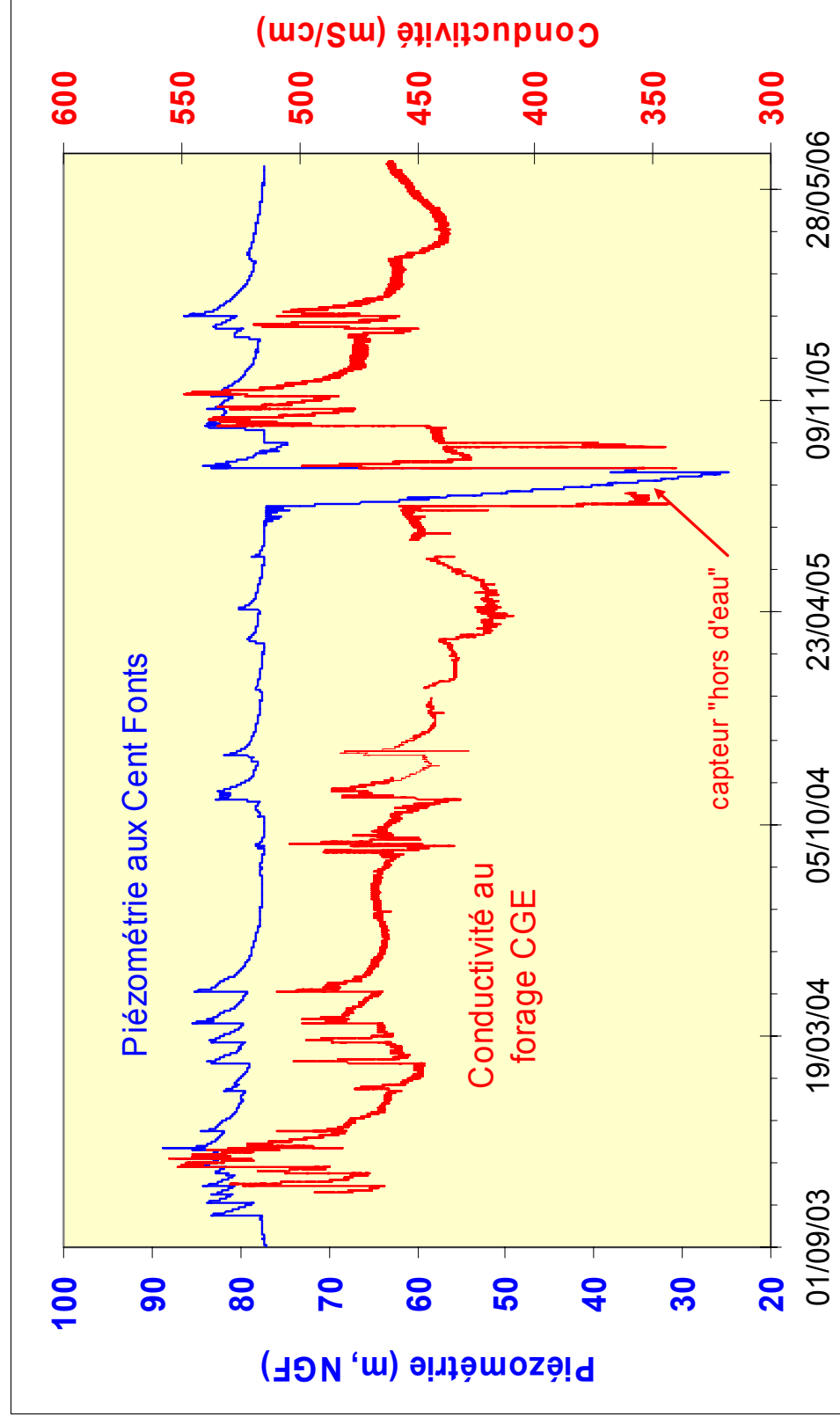
Rapport complet sur CD-Rom

Annexe 6

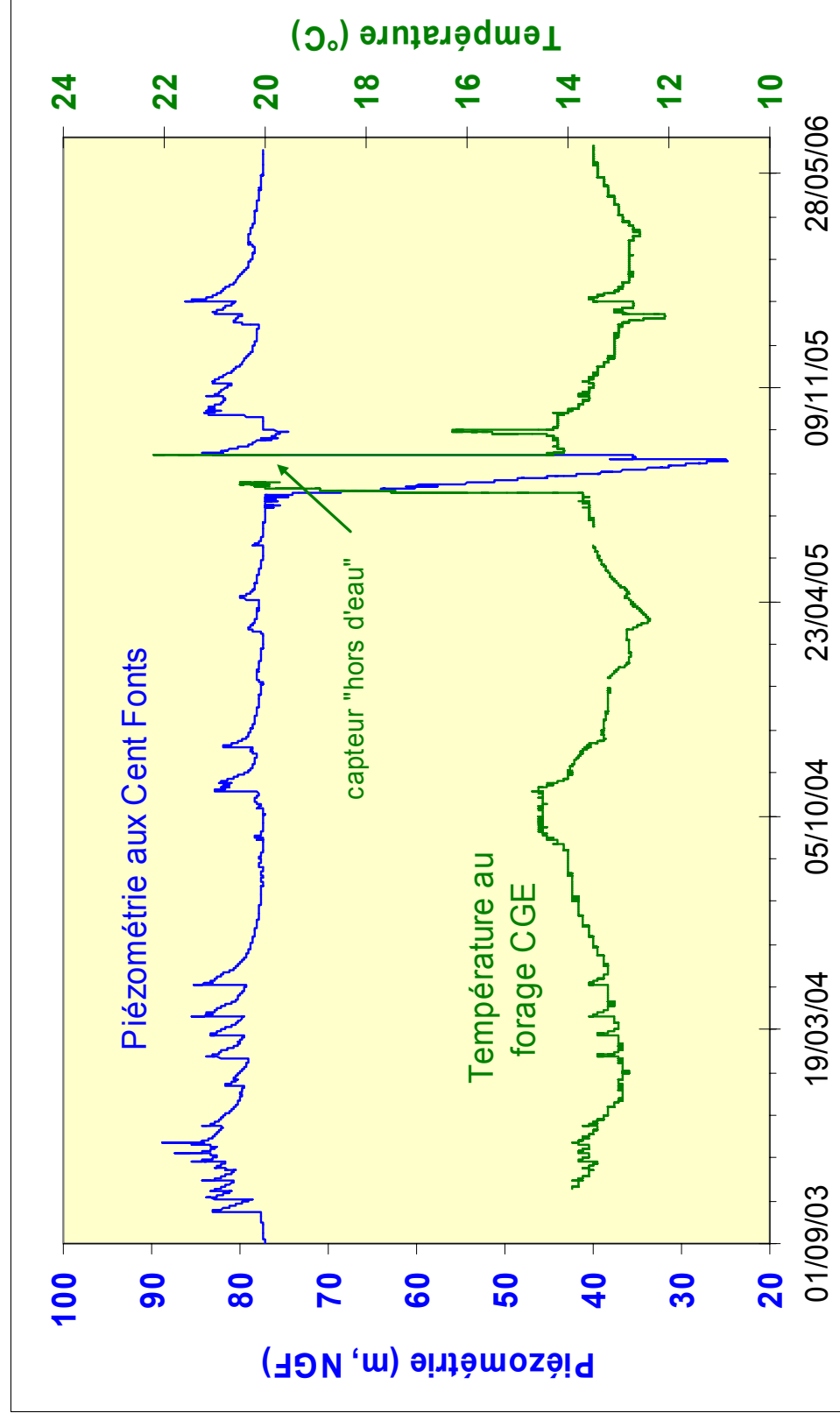
Présentation des résultats des suivis hydrologiques réalisés depuis septembre 2005 sur le système karstique des Cent Fonts



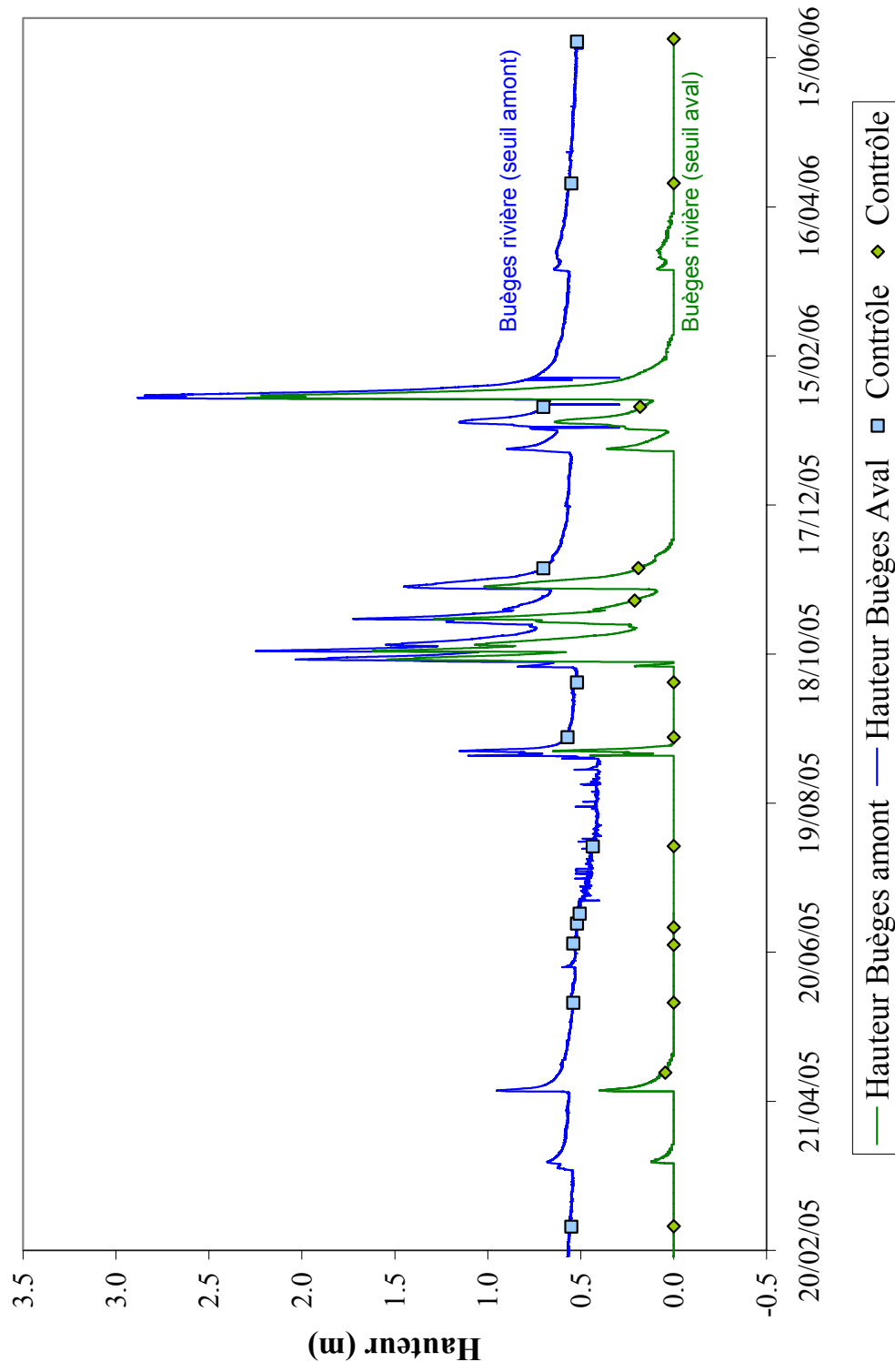
Annexe_Illustration 31. Evolution de la piézométrie des Cent Fonts du 01 janvier 2005 au 21 juin 2006



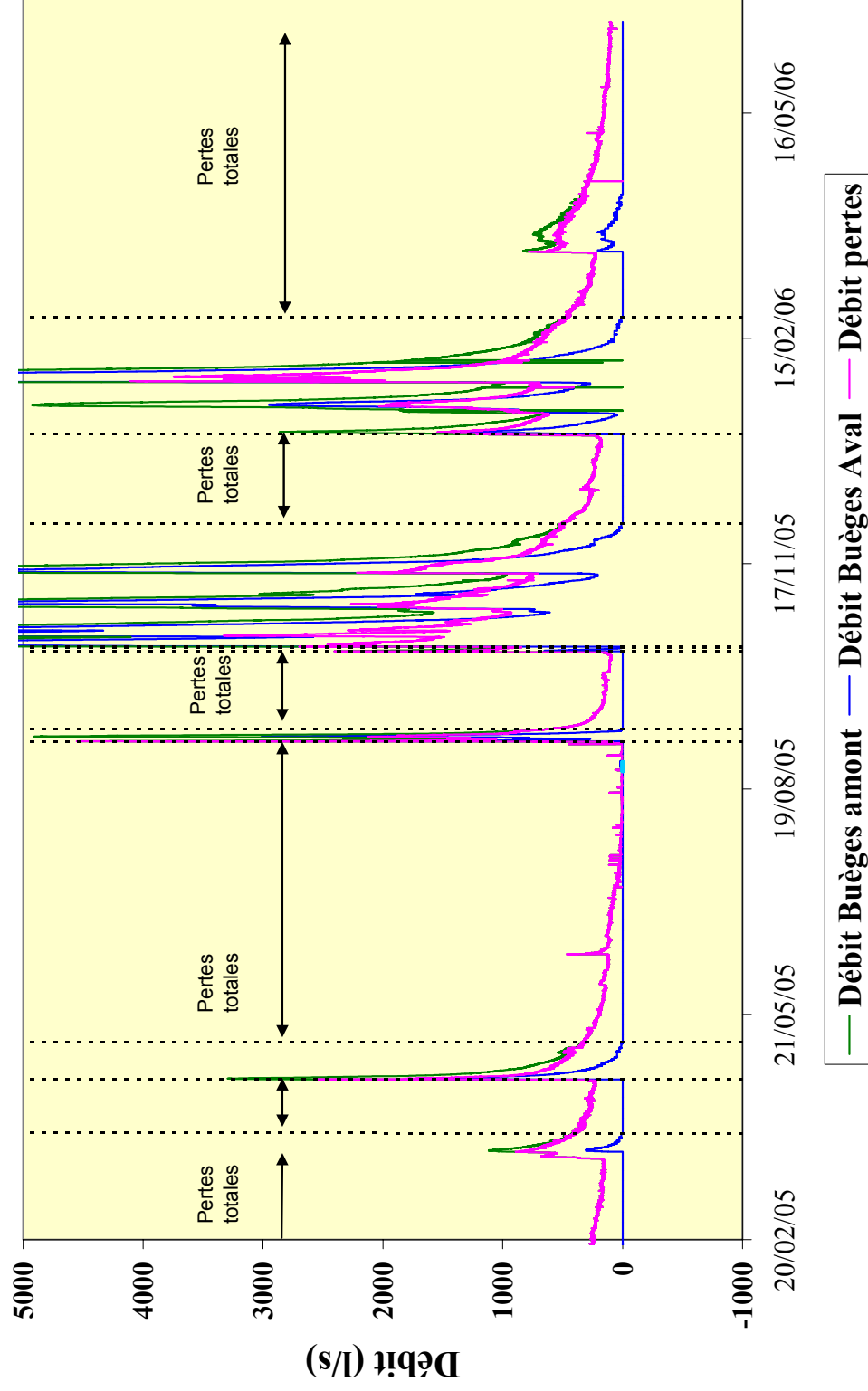
Annexe_Illustration 32. Evolution temporelle de la piézométrie et de la conductivité des eaux des Cent Fonts sur la période d'octobre 2003 à juin 2006



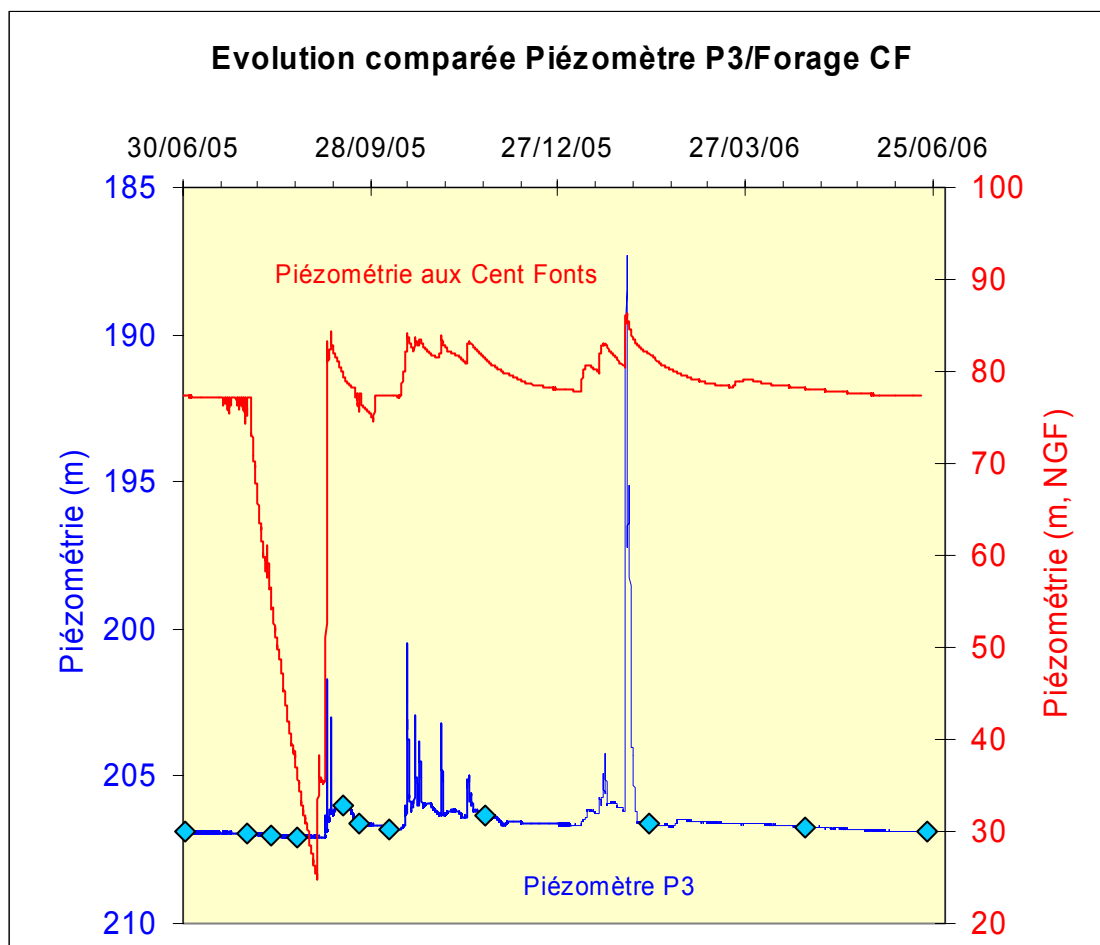
Annexe_Illustration 33. Evolution temporelle de la piézométrie et de la température des eaux des Cent Fonts sur la période d'octobre 2003 à juin 2006



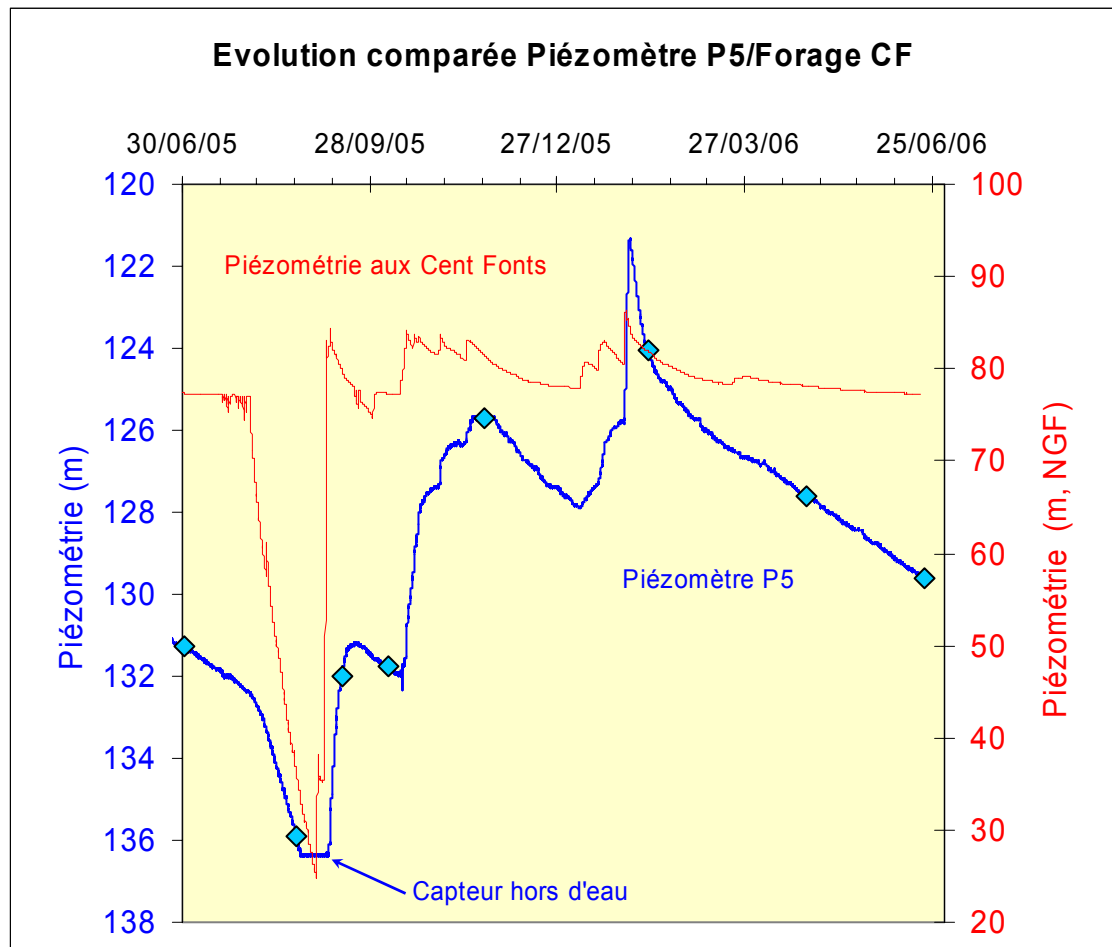
Annexe_Illustration 34. Evolution temporelle des hauteurs d'eau mesurées sur la rivière de la Buèges en amont et aval de la zone des pertes (période février 2005 – juin 2006).



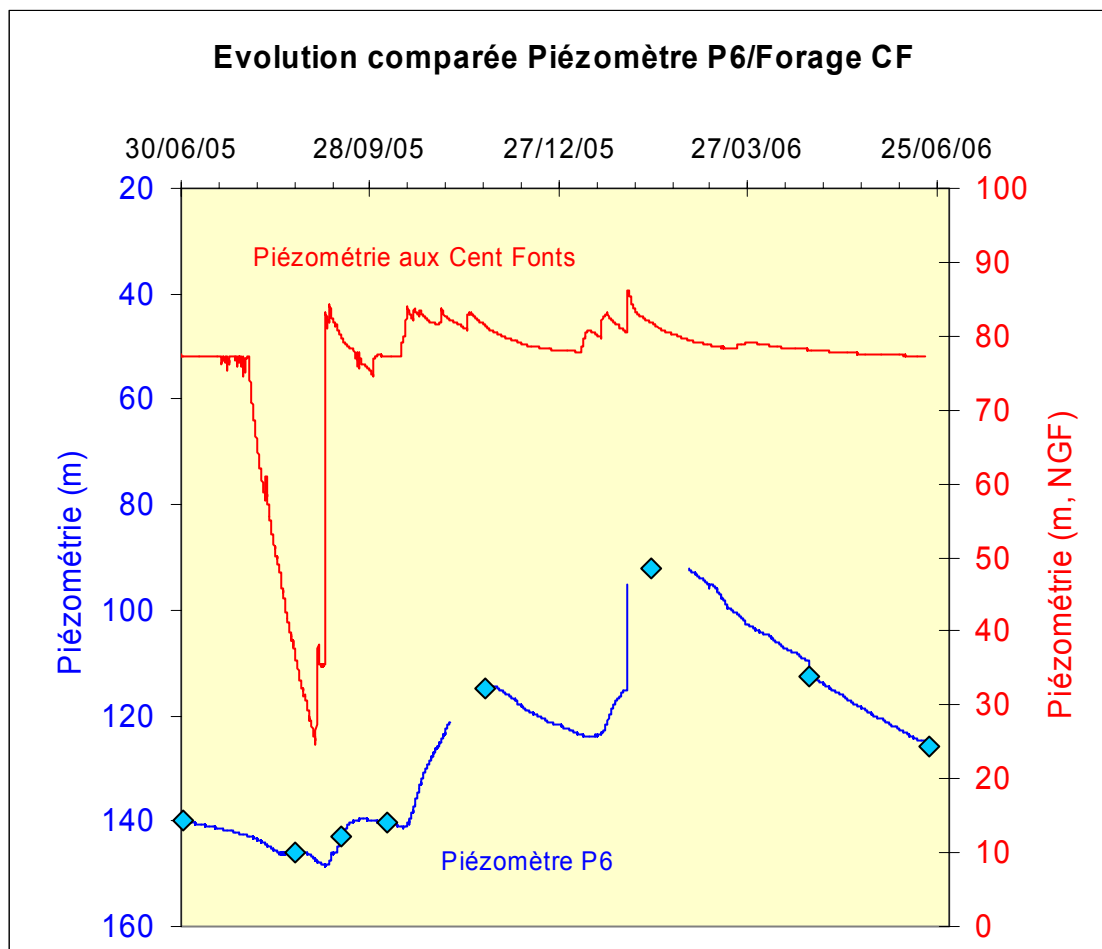
Annexe_Illustration 35. Evolution temporelle des débits de la Buèges en amont et aval de la zone des pertes (période février 2005 – juin 2006). Le débit des pertes de la buèges est également présenté.



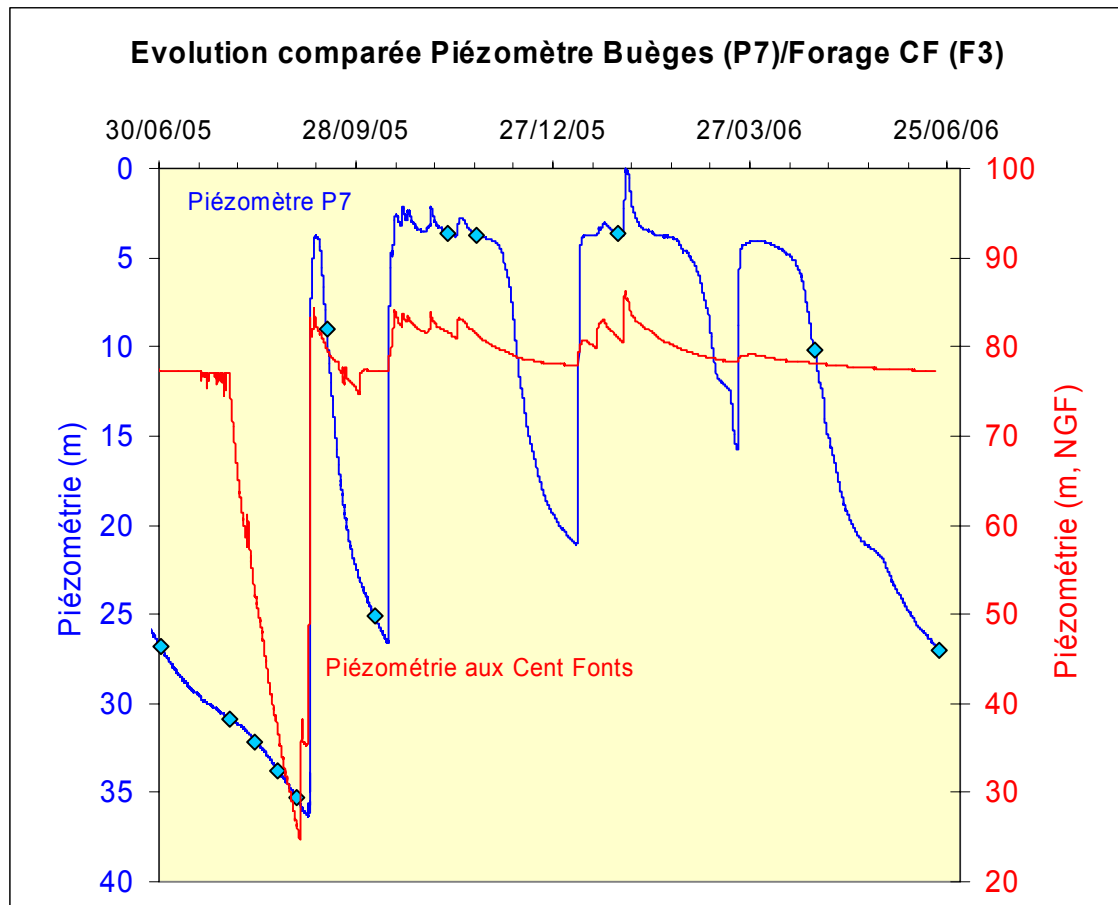
Annexe_Illustration 36. Evolution temporelle de la piézométrie au piézomètre P3 (BSS : 09635X0257) sur la période du 30/06/05 au 22/06/06. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée.



Annexe_Illustration 37. Evolution temporelle de la piézométrie au piézomètre P5 (BSS : 09635X0255) sur la période du 30/06/05 au 22/06/06. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée.



Annexe_Illustration 38. Evolution temporelle de la piézométrie au piézomètre P6 (BSS : 09635X0254) sur la période du 30/06/05 au 22/06/06. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée.



Annexe_Illustration 39. Evolution temporelle de la piézométrie au piézomètre P6 (BSS : 09631X080) sur la période du 30/06/05 au 22/06/06. L'évolution du niveau piézométrique dans le drain des Cent Fonts est également reportée.

Annexe 7

Débit de l'Hérault



L'HERAULT A CAUSSE-DE-LA-SELLE [MOULIN DE BERTRAND]

Zone hydrographique : Y2132010 Bassin versant : 1090 km²

Producteur : CN du Bas-Rhône-Languedoc

E-mail : brl@brl.fr

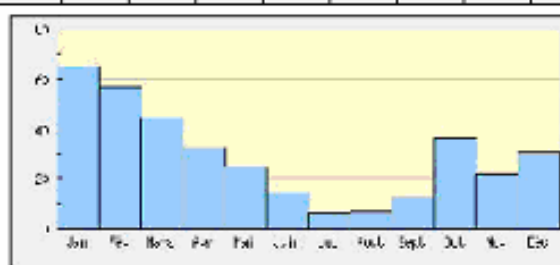
SYNTHESE

données hydrologiques de synthèse (1967 - 1981)
Calculées le 15/08/2008; Intervalle de confiance : 95 %

écoulements mensuels (naturels)

données calculées sur 15 ans

	janv.	fév.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
Débits (m ³ /s)	65.00	57.00	44.50	32.50	24.90	14.50 #	6.030	6.660	13.00	35.90	21.50	30.20 #	29.20
Qsp (l/s/km ²)	59.6	52.3	40.8	29.8	22.8	13.3 #	5.5	6.1	11.9	32.9	19.7	27.7 #	26.8
Lame d'eau (mm)	159	131	109	77	61	34 #	14	16	30	88	51	74 #	848



modules interannuels (loi de Galton - septembre à août)

données calculées sur 15 ans

module (moyenne)	fréquence	quinquennale sèche	médiane	quinquennale humide
29.20 [24.50;34.70]		20.00 [16.00;24.00]	29.00 [20.00;45.00]	37.00 [31.00;47.00]

basses eaux (loi de Galton - janvier à décembre)

données calculées sur 15 ans

fréquence	VGN3 (m ³ /s)	VGN10 (m ³ /s)	QMNA (m ³ /s)
biennale	2.600 [2.100;3.400]	3.200 [2.800;3.700]	4.100 [3.700;4.500]
quinquennale sèche	1.800 [1.300;2.300]	2.600 [2.200;3.000]	3.400 [2.900;3.700]

crues (loi de Gumbel - septembre à août)

données calculées sur 14 ans

fréquence	QJ (m ³ /s)	QIX (m ³ /s)
biennale	960.0 [460.0;710.0]	790.0 [680.0;960.0]
quinquennale	800.0 [690.0;1100.]	1100. [950.0;1400.]
décennale	960.0 [810.0;1400.]	1300. [1100.;1700.]
vicennale	1100. [930.0;1600.]	1500. [1300.;2100.]
cinquantiennale	non calculé	[:]
centennale	non calculé	non calculé

maximums connus (par la banque HYDRO)

hauteur maximale instantanée (cm)		
débit instantané maximal (m ³ /s)	1190.	1 octobre 1979 00.00
débit journalier maximal (m ³ /s)	896.0	17 janvier 1972

débits classés

données calculées sur 5469 jours

fréquence	0.99	0.95	0.90	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
débit (m ³ /s)	317.0	214.0	115.0	62.20	32.80	22.40	14.70	10.50	7.910	5.940	4.650	3.630	3.250	2.860

Annexe_Illustration 40. Eléments de statistique descriptive des débits du Fleuve Hérault au Moulin de Bertrand sur la période 1967-1981 (données de la Banque Hydro).

A7-1). Analyse critique des fichiers de données brutes du Moulin de Bertrand (cesml) (fichier communiqué par le CG34 dans le cadre de cette étude).

Description générale du fichier de données

Les fichiers de données (1 par année, période 1998-2005) transmis se composent de la manière suivante :

DATE	Hauteur totale mm	Hauteur sur vesse mm	A =Debit sur vesse m3/s	Puissance Groupe 1 KW	Puissance Groupe 2 KW	Puissance Groupe 3 KW	Puissance total KW	B= Debit Groupe m3/s	Debit Total m3/s (A+B)
jj/mm/aaaa	2 030	1030	235.2	405	415	425	1245	15	250.2
jj/mm/aaaa	1 680	680	126.2	405	415	0	820	10	136.2
jj/mm/aaaa	1 510	510	81.9	405	0	0	405	8	89.9
jj/mm/aaaa	1 400	400	56.9	200	0	0	200	3	59.9
jj/mm/aaaa	1 370	370	50.60	0	0	0	0	0	50.6

La première colonne renseigne la date. Sur la deuxième et la troisième colonne sont reportées respectivement, la hauteur totale et la hauteur de sur vesse. La hauteur de sur vesse correspond à la hauteur d'eau qui s'écoule au sommet du barrage. A l'analyse des données disponibles au sein du fichier, il apparaît que le débit de sur vesse est lié à la hauteur de sur vesse par une relation mathématique de type puissance ($Q=0.00071 \cdot H^{1.5}$). La 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} colonnes renseignent les puissances électriques des différents groupes produisant de l'électricité. A l'analyse des données disponibles, il apparaît que le débit total des groupes (9^{ème} colonne) soit relié linéairement à la puissance totale (8^{ème} colonne¹²). Le débit total correspond à la somme du débit de sur vesse et du débit des groupes.

A l'analyse des données brutes, il apparaît que le débit total n'est pas renseigné lorsque la hauteur de sur vesse devient égale à zéro. Ceci ne correspond pas à la réalité puisqu'il existe toujours un écoulement dans l'Hérault. Cet écoulement correspond d'une part aux fuites du barrage et au débit de la passe à poissons. Le débit total de ces écoulements est évalué à 1.6 m3/s (cesml, com. pers.)

A l'analyse des données, il apparaît également que les groupes électriques ne sont pas mis en fonctionnement lors des périodes estivales dès lors que le niveau de sur vesse devient inférieur à 5 mm. Il est à noter que la mise en marche des différents groupes électriques se traduit par une diminution des hauteurs d'eau mesurées (hauteur totale et hauteur de sur vesse).

Analyse de la cohérence du fichier de données.

Les débits de sur vesse calculés à partir des hauteurs de sur vesse apparaissent globalement cohérents. Pour les débits de groupe, il apparaît que certains débits de groupe ne sont pas renseignés alors qu'il existe une (ou des) information(s) de

¹² La colonne intitulée puissance totale n'est pas présente dans les fichiers brutes de données. Elle a été créée pour aider à l'analyse des données disponibles.

puissance de groupe. A l'inverse, le débit de groupe est parfois renseigné alors que les puissances de groupe ne le sont pas.

Corrections apportées au fichier de données.

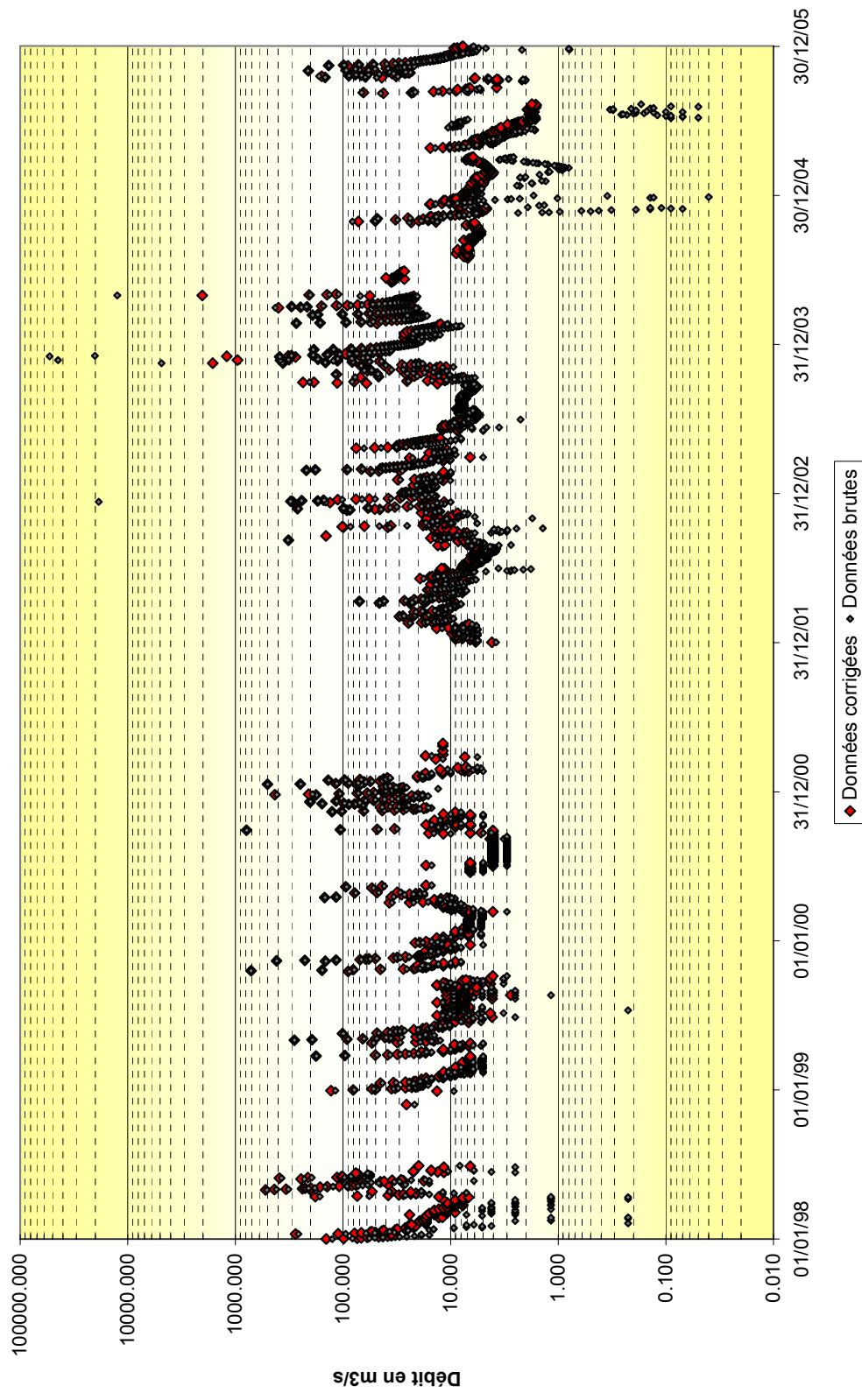
La première correction a donc consisté à calculer le débit de groupe lorsque les puissances de groupe étaient connues.

La seconde correction a consisté à rajouter un débit de 1.6 m³/s au débit total calculé. Ce débit que l'on a supposé constant tout au long de l'année correspond aux écoulements de fuites et de la passe à poissons.

La nouvelle chronique obtenue a été confrontée aux valeurs du débit de l'Hérault mesurées à Laroque et aux débits mesurés aux Cent Fonts (Annexe_Illustration 41) afin d'identifier les données aberrantes. Les valeurs manifestement aberrantes de débit ont été supprimées. Le résultat final de la donnée corrigée est reporté sur l'illustration (Annexe_Illustration 41).

Des éléments de statistiques descriptives sur la chronique corrigée du débit du Moulin de Bertrand sont présentés ci-dessous.

Période du 01/01/1998 au 31/12/2005	Var
Nbr. de valeurs utilisées	2144
Nbr. de valeurs ignorées	736
Minimum	1.6
1er quartile	6.8
Médiane	11.5
3ème quartile	22.2
Maximum	1626
Moyenne	27.9
Moyenne géométrique	13.5
Moyenne harmonique	9.2
Aplatissement	187.6
Asymétrie	11.2

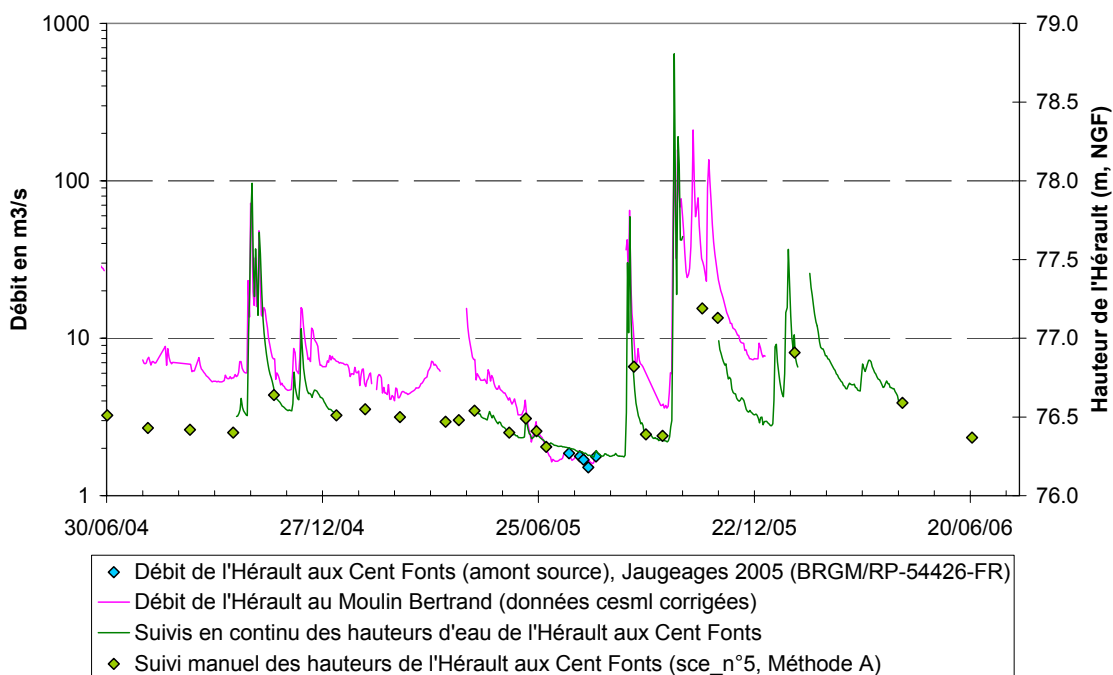


Annexe_Illustration 41. Evolution temporelle des débits du fleuve Hérault au Moulin Bertrand depuis 1998 (données brutes et données corrigées).

A7-2). Caractérisation de la relation reliant le débit du Moulin de Bertrand (données corrigées du cesml) au niveau d'eau de l'Hérault mesuré au niveau des émergences des Cent Fonts (Mire) : METHODE A.

Nous présentons sur l'illustration suivante (Annexe_Illustration 42), l'évolution des débits de l'Hérault au Moulin de Bertrand (données corrigées du cesml) ainsi que les hauteurs d'eau du fleuve mesurées au niveau du site des Cent-Fonts. Les valeurs des débits jaugés à l'amont des sources des Cent Fonts en 2005 (cf. BRGM/RP-54426-FR) sont également reportées. Les débits de l'Hérault au Moulin de Bertrand apparaissent cohérents aux débits jaugés.

Sur la période du 30/06/04 au 31/12/2005, nous avons cherché à évaluer la relation qui relie le débit au Moulin de Bertrand aux hauteurs d'eau mesurées au site des Cent Fonts afin de reconstituer les lacunes de données de la chronique de débit du Moulin de Bertrand.



Annexe_Illustration 42. Evolution temporelle des débits du fleuve Hérault au Moulin Bertrand (données cesml corrigées) et des hauteurs d'eau mesurées aux Cent Fonts depuis juin 2004..

La relation qui relie le débit de l'Hérault au Moulin de Bertrand aux hauteurs d'eau mesurées aux Cent Fonts est de type puissance. Les caractéristiques sont présentées sur l'illustration suivante (Annexe_Illustration 43). Les débits estimés suivant cette méthode sont reportés dans l'illustration (Annexe_Illustration 44) et dans le Tableau 32.

Résumé pour la variable dépendante (Y):

Variable	Nombre de valeurs	Nb de valeurs utilisées	Somme des poids	Moyenne	Ecart-type
Y	172	172	172	10.158	20.488

Résumé pour les variables quantitatives (X):

Variable	Moyenne	Ecart-type
X	1.045	0.384

Résultats pour le modèle ajusté :

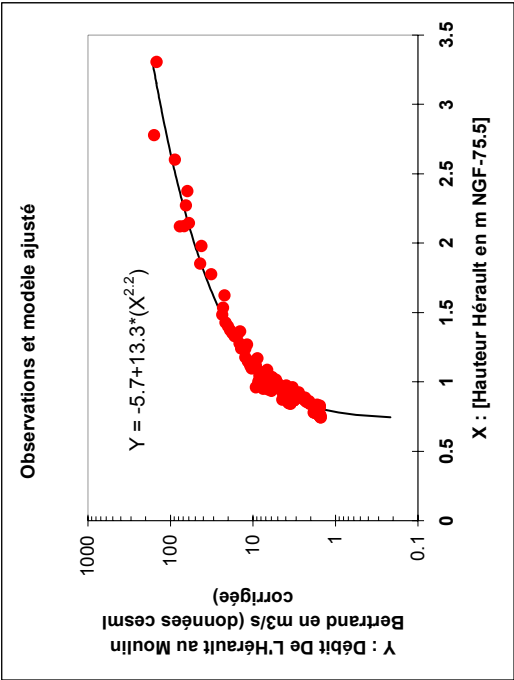
Modèle	Equation	R²	SCR
pr1+pr2*(X^pr3)	-5.7+13.3*(X^2.2)	0.951	3516.616

Coefficients d'ajustement :

R (coefficient de corrélati	0.975
R² (coefficient de déterm	0.951
SCR	3516.616

Paramètres du modèle :

Paramètres	Valeur
pr1	-5.7
pr2	13.3
pr3	2.2

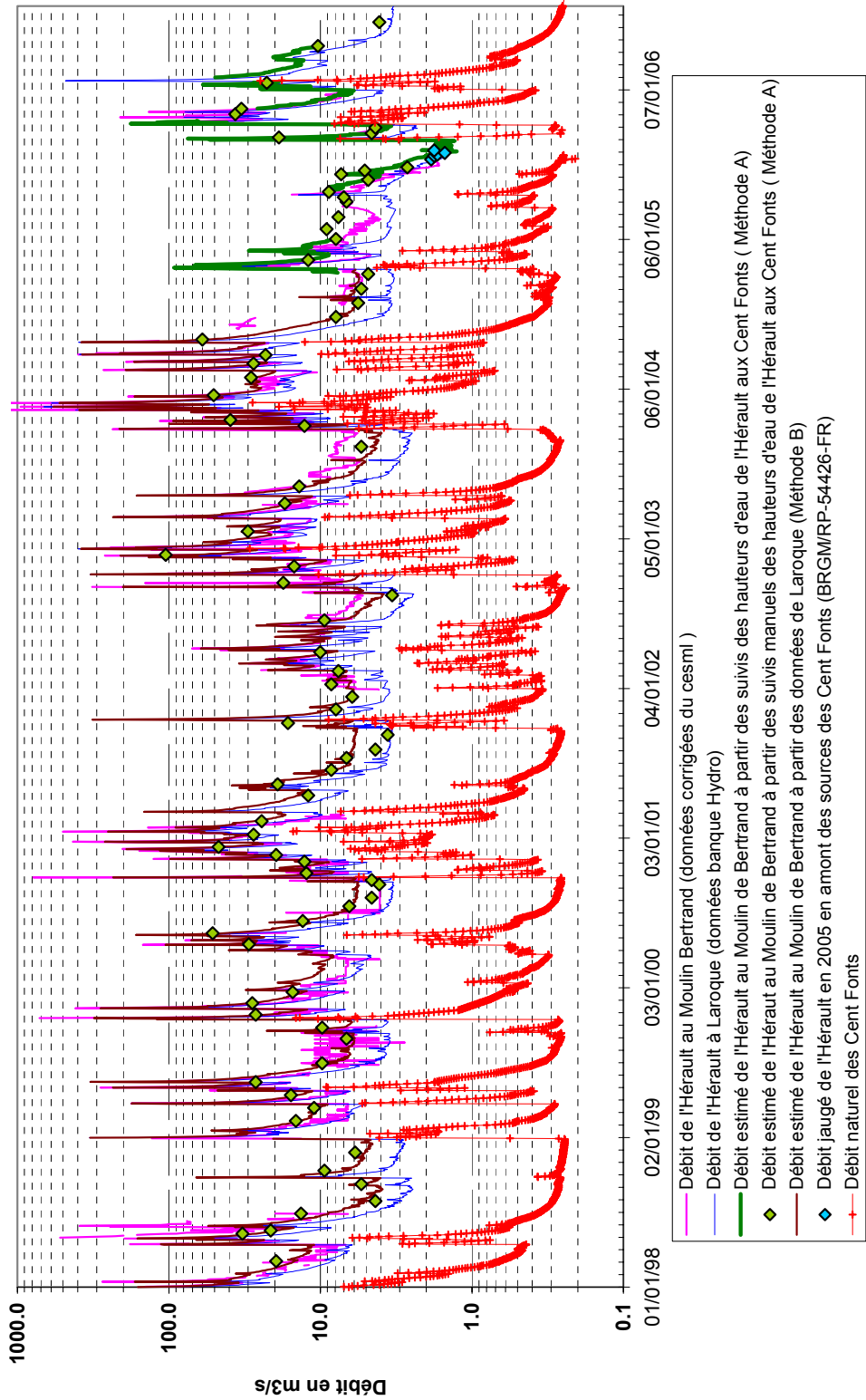


Annexe_ Illustration 43. Relation qui relie le débit de l'Hérault au Moulin de Bertrand (données corrigées du cesml) aux hauteurs d'eau de l'Hérault mesurées au site des Cent Fonts.

Tableau 32 - Débit de l'Hérault en amont des Cent Fonts déduit des suivis ponctuelles des niveaux d'eau (Mire) suivant les paramètres de la fonction mathématique de la Méthode A.

Date	Hauteur Hérault m, NGF	X pour courbe de tarage (en m)	Q Hérault (amont source) déduit m3/s
05/03/98	76.84	1.34	19.6
11/05/98	77.12	1.62	32.7
19/05/98	76.88	1.38	21.3
29/06/98	76.68	1.18	13.4
30/07/98	76.38	0.88	4.3
09/09/98	76.42	0.92	5.4
12/10/98	76.56	1.06	9.4
26/11/98	76.44	0.94	5.9
11/02/99	76.71	1.21	14.5
15/03/99	76.61	1.11	11.0
15/04/99	76.74	1.24	15.6
17/05/99	77	1.5	26.8
02/07/99	76.57	1.07	9.7
31/08/99	76.47	0.97	6.7
27/09/99	76.57	1.07	9.7
29/10/99	77	1.5	26.8
26/11/99	77.03	1.53	28.2
23/12/99	76.73	1.23	15.3
18/04/00	77.06	1.56	29.7
15/05/00	77.44	1.94	51.4
14/06/00	76.67	1.17	13.1
20/07/00	76.46	0.96	6.5
10/08/00	76.39	0.89	4.6
11/09/00	76.37	0.87	4.1
22/09/00	76.39	0.89	4.6
09/10/00	76.65	1.15	12.4
06/11/00	76.66	1.16	12.7
22/11/00	76.84	1.34	19.6
12/12/00	77.37	1.87	47.0
11/01/01	77.02	1.52	27.7
13/02/01	76.95	1.45	24.4
17/04/01	76.64	1.14	12.0
14/05/01	76.83	1.33	19.2
18/06/01	76.53	1.03	8.5
18/07/01	76.47	0.97	6.7
07/08/01	76.38	0.88	4.3
12/09/01	76.35	0.85	3.6
11/10/01	76.76	1.26	16.4
14/11/01	76.51	1.01	7.9
14/12/01	76.45	0.95	6.2
14/01/02	76.53	1.03	8.5
15/02/02	76.5	1	7.6
03/04/02	76.58	1.08	10.1
19/06/02	76.56	1.06	9.4
19/08/02	76.34	0.84	3.4
19/09/02	76.79	1.29	17.6

Date	Hauteur Hérault m, NGF	X pour courbe de tarage (en m)	Q Hérault (amont source) déduit m3/s
29/10/02	76.72	1.22	14.9
26/11/02	78.12	2.62	105.0
23/01/03	77.07	1.57	30.2
01/04/03	76.78	1.28	17.2
13/05/03	76.69	1.19	13.8
18/08/03	76.42	0.92	5.4
08/10/03	76.66	1.16	12.7
22/10/03	77.24	1.74	39.3
22/12/03	77.43	1.93	50.8
03/02/04	77.04	1.54	28.7
08/03/04	77.02	1.52	27.7
29/03/04	76.92	1.42	23.1
06/05/04	77.57	2.07	60.2
30/06/04	76.51	1.01	7.9
03/08/04	76.43	0.93	5.6
07/09/04	76.42	0.92	5.4
13/10/04	76.4	0.9	4.8
16/11/04	76.64	1.14	12.0
07/01/05	76.51	1.01	7.9
31/01/05	76.55	1.05	9.1
01/03/05	76.5	1	7.6
08/04/05	76.47	0.97	6.7
19/04/05	76.48	0.98	7.0
02/05/05	76.54	1.04	8.8
31/05/05	76.4	0.9	4.8
14/06/05	76.49	0.99	7.3
23/06/05	76.41	0.91	5.1
01/07/05	76.31	0.81	2.7
12/09/05	76.82	1.32	18.8
22/09/05	76.39	0.89	4.6
06/10/05	76.38	0.88	4.3
08/11/05	77.19	1.69	36.5
21/11/05	77.13	1.63	33.3
24/01/06	76.91	1.41	22.6
24/04/06	76.59	1.09	10.4
21/06/06	76.37	0.87	4.1



Annexe_Illustration 44. Evolution temporelle des débits du fleuve Hérault à Laroque, au Moulin Bertrand et au Cent Fonts depuis 1998. L'évolution du débit des Cent Fonts est également reportée.

A7-3). Caractérisation de la relation reliant le débit de l'Hérault mesuré à Laroque au débit du Moulin de Bertrand (données corrigées du cesml) : METHODE B.

Toujours dans le but de reconstituer les lacunes de débit au Moulin de Bertrand, nous avons cherché à évaluer la relation qui relie le débit au Moulin de Bertrand au débit mesuré à Laroque.

La relation qui relie le débit de l'Hérault au Moulin de Bertrand au débit à Laroque est de type puissance, les caractéristiques sont présentées sur l'illustration suivante (Annexe_Illustration 45). Les débits estimés suivant cette méthode sont reportés dans l'illustration (Annexe_Illustration 44).

Résumé pour la variable dépendante (Y) :

Variable	Nombre de valeurs	Somme des poids	Moyenne	Ecart-type
Y	315	315	12.986	17.459

Résumé pour les variables quantitatives (X) :

Variable	Moyenne	Ecart-type
X	8.536	12.436

Résultats pour le modèle ajusté :

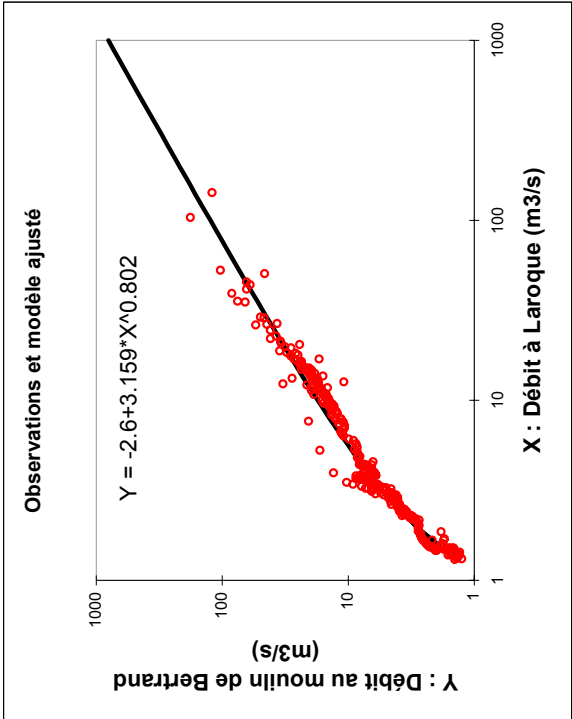
Modèle	Equation	R²	SCR
pr1+pr2*(X1^pr3)	-2.6+3.159*X^0.802	0.900	9559.475

Coefficients d'ajustement :

R (coefficient de cor	0.949
R² (coefficient de dé	0.900
SCR	9559.475

Paramètres du modèle :

Paramètres	Valeur	Ecart-type
pr1	-2.600	
pr2	3.159	
pr3	0.802	



Annexe_Illustration 45. Relation qui relie le débit de l'Hérault à Laroque au débit de l'Hérault au Moulin de Bertrand (données corrigées du cesml)

Annexe 8

Suivi hydrobiologique de la faune stygobie



**Interprétation du suivi hydrobiologique
de la faune stygobie, réalisé sur le
système karstique des Cent Fonts lors
du pompage d'essai**



M.-J. OLIVIER, D. MARTIN, C. BOU, V. PRIE
avec la participation de
D. GALASSI et P. MARMONIER

Septembre 2006

Laboratoire d'Hydrobiologie et Ecologie Souterraines
CNRS, UMR 5023.
Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux
Université CLAUDE BERNARD - Lyon1 - Bât. FOREL -
6, rue Raphaël DUBOIS - 43 Bd du 11 Novembre 1918
F-69622 VILLEURBANNE Cedex - FRANCE



SOMMAIRE

Interprétation du suivi hydrobiologique de la faune stygobie réalisé sur le système karstique des Cent Fonts lors du pompage d'essai	Erreur ! Signet non défini.
1.1. INTRODUCTION	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.2. EFFETS D'UN POMPAGE SUR LES COMMUNAUTES STYGOBIES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.3. POURQUOI UN SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DES ESPECES STYGOBIES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.3.1. Particularités des espèces stygobies en relation avec l'extraction d'eau	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2. Implications en termes de vulnérabilité des populations et de protection des espèces	Erreur ! Signet non défini.
1.4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.4.1. Échantillonnage prévu.....	Erreur ! Signet non défini.
1.4.2. Echantillonnage réalisé	Erreur ! Signet non défini.
1.5. METHODOLOGIE, PRELEVEMENTS, ANALYSE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.5.1. Inventaires.....	Erreur ! Signet non défini.
1.5.2. Filtrages en continu de la faune extraite lors du pompage d'essai	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3. Analyse des échantillons.....	Erreur ! Signet non défini.
1.5.4. Niveaux de détermination taxonomique	Erreur ! Signet non défini.
1.6. RESULTATS	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.6.1. Inventaire général des espèces stygobies récoltées aux Cent-Fonts	Erreur ! Signet non défini.
1.6.2. Faune extraite lors des pompages	Erreur ! Signet non défini.
1.6.3. Inventaire comparatif PRE / POST pompages.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7. DISCUSSION / INTERPRETATION.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.7.1. Crue /pompage ou dérivation naturelle des organismes versus dérivation artificielle	Erreur ! Signet non défini.
1.7.2. Contamination par les eaux de surface.....	Erreur ! Signet non défini.
1.7.3. Exondation du massif.....	Erreur ! Signet non défini.
1.8. RECOMMANDATIONS, PERSPECTIVES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
1.9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
1.10. ANNEXES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

1. Interprétation du suivi hydrobiologique de la faune stygobie réalisé sur le système karstique des Cent Fonts lors du pompage d'essai

M-J OLIVIER, D. MARTIN, C. BOU, V. PRIE avec la participation de D. GALASSI & P. MARMONIER.

1.1. INTRODUCTION

Le massif des Cent Fonts est un système karstique situé en rive droite de la moyenne vallée de l'Hérault sur la commune de Causse-de-la-Selle (Hérault). C'est un karst binaire, alimenté à la fois par les précipitations qui tombent sur le Causse et par les pertes de la Buèges (affluent de l'Hérault), situées à plus de 8 km en amont.

Après la description par Fage (1937) du crustacé souterrain *Troglocaris inermis* récolté dans l'évent de Cambou (Gard) puis sa découverte dans d'autres aquifères qui bordent l'Hérault, la faune aquatique vivant dans le massif des Cent Fonts a été plus largement explorée. Elle a fait l'objet d'un travail de recherche il y a près de quarante ans par le laboratoire CNRS de Moulis, Ariège (Rouch *et al.*, 1968). Le système a été étudié en conditions naturelles au niveau de l'ensemble des griffons, des regards et de la grotte pour les périodes de novembre 1967 à février 1968 et de mai et juillet 1968.

Ce site fait l'objet d'une ZNIEFF¹ de type I (910009549 «Les Cent Fonts») et le bassin versant est partiellement recouvert par une ZNIEFF de type II (9100009548 «Gorges de l'Hérault et du Lamalou») qui mentionnent notamment la richesse exceptionnelle du site en crustacés souterrains, et la présence, outre du décapode *Troglocaris inermis*, de l'Amphipode *Ingolfiella cf. thibaudi*, et des Isopodes *Stenasellus buili*, *Proasellus cavaticus* et *Sphaeromides raymondi* (Botosaneanu, 1998).

Il fait également l'objet d'une proposition de site d'intérêt communautaire (futur site Natura 2000), le site FR 9101388 «Gorges de l'Hérault», intégrant la Zone de Protection Spéciale pour les oiseaux FR 9112004 «Hautes garrigues du Montpelliérain».

Dans ce contexte de labellisation et de reconnaissance officielle de la qualité du site, le projet d'exploitation du massif des Cent Fonts a fait l'objet d'une première étude d'impact (TERCIA, Acer campestre, 2001) liée aux travaux de forage et d'installation du matériel d'extraction. Le projet d'essais de pompage d'eau devait donc au même titre, faire l'objet d'un suivi biologique mais portant cette fois-ci sur la faune vivant à l'intérieur du massif, dans les eaux souterraines sollicitées par l'extraction. Les essais de pompage, réalisés au cours de l'étiage 2005 dans le but de préciser l'importance et la qualité de la ressource en eau, d'évaluer la fraction mobilisable du gisement et son comportement lors d'une extraction continue et à fort débit, se sont donc accompagnés d'un échantillonnage hydrobiologique.

¹ Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique ou Floristique

Comme la plupart des aquifères, le système karstique des Cent Fonts, est colonisé par un assemblage hétérogène d'espèces aquatiques, de caractéristiques biologiques et écologiques très diverses (Rouch, 1982). Les unes vivent exclusivement dans les eaux de surface. Leur présence dans l'aquifère indique une intrusion, fonctionnelle ou dysfonctionnelle, des eaux de surface dans le milieu souterrain (Rouch, 1977). D'autres résident dans l'aquifère sur un plus long terme et partagent leur cycle vital entre les eaux de surface et les eaux souterraines, certaines étant capables de développer des populations durables dans chacun des deux milieux (Gibert *et al.*, 1994). Une dernière catégorie renferme des espèces vivant exclusivement dans les eaux souterraines. Elles sont qualifiées de stygobies, par référence au Styx, le fleuve des ténèbres. Ce sont ces dernières espèces, très particulières par rapport à leurs homologues des eaux de surface, qui ont fait l'objet du suivi biologique accompagnant les essais de pompage du karst des Cent Fonts.

1.2. EFFETS D'UN POMPAGE SUR LES COMMUNAUTES STYGOBIES

Au préalable, il est nécessaire de rappeler qu'il existe peu de données hydrobiologiques disponibles sur des systèmes sollicités par pompage sur du long terme, fournissant des éléments comparatifs.

Les dommages possibles occasionnés par un pompage intensif de l'eau souterraine du massif sur les communautés stygobiontes ont été recensés selon trois origines distinctes:

- (1) **l'extraction directe d'animaux:** un entraînement prévisible des organismes dans les turbines des pompes et leur éjection à l'extérieur du massif a été pris en compte. La survie des organismes stygobiontes rejetés dans les eaux de surface est impossible. Si le taux d'extraction est trop important et dépasse un seuil limite, les populations encourent un risque d'extinction. Le seuil limite d'extraction acceptable pourrait raisonnablement correspondre à celui qui est observé lors des éjections naturelles qui se produisent régulièrement en période de crue (connues sous le nom de «dérive» ou «drift») et qui entrent dans un processus normal de fonctionnement de l'écosystème karstique. L'«hémorragie²» naturelle d'organismes aux exutoires lors de crues moyennes n'affecte généralement pas les populations des karsts sur le long terme (Rouch, 1980 ; Gibert, 1986). La quantification directe de cet entraînement passif a été réalisée lors des essais de pompages sur les eaux d'exhaure.
- des modifications internes, liées à l'abaissement rapide et conséquent du niveau piézométrique, devant entraîner:
- (2) **une exondation prolongée d'une partie du massif**, face à laquelle très peu d'espèces disposent de stratégies de résistance. Cet effet est partiellement contrôlé par l'inventaire post-pompage présenté dans cette étude, mais l'évaluation ne peut être complète qu'à partir d'un suivi à plus long terme.
- (3) **une intrusion d'eau de surface** par le lit de l'Hérault due à une faille située au droit des sources, dont l'intensité a été évaluée par l'étude hydrogéologique (cf. rapport BRGM RP-54426-FR, chapitre 5, 5.4.2). Cette eau est susceptible de véhiculer des organismes et des bactéries de surface, de la matière organique, des nutriments et polluants divers jusqu'au point de pompage. Cette intrusion peut modifier le fonctionnement biologique du

² terme utilisé uniquement par R. Rouch pour le système karstique alors que dérive et drift sont des termes généraux en hydrobiologie

système. La dynamique d'apparition d'invertébrés exogènes (stygoxènes), indicateurs de cette contamination, est abordée dans ce rapport, mais les effets de telles intrusions (si elles devaient devenir chroniques) sur le fonctionnement de l'écosystème à plus long terme, n'a pas été pris en compte dans le protocole de suivi mis en oeuvre.

- Enfin la conjonction des trois phénomènes peut accentuer la vulnérabilité de l'écosystème sur le long terme.

1.3. POURQUOI UN SUIVI HYDROBIOLOGIQUE DES ESPECES STYGOBIES

1.3.1. Particularités des espèces stygobies en relation avec l'extraction d'eau

Les organismes stygobies sont des espèces originales. Elles ont développé, au cours d'une longue évolution (généralement plusieurs dizaines de millions d'années), des caractéristiques biologiques et des capacités physiologiques qui répondent aux contraintes que leur impose le milieu souterrain. Ces contraintes correspondent tout d'abord à une absence de lumière donc de production primaire. Sans ce maillon trophique élémentaire, habituel point d'ancrage de la chaîne alimentaire, l'écosystème souterrain est contraint à l'hétérotrophie et les organismes qui y vivent doivent s'adapter à la rareté des ressources énergétiques et à l'allotrophie (transport des ressources énergétiques depuis la surface). Les eaux souterraines profondes sont également appauvries en oxygène et les organismes ont à faire face à une exposition fréquente à l'hypoxie. Les modifications anthropiques de l'environnement souterrain constituent une pression supplémentaire que les espèces doivent affronter et qui s'applique suivant une chronologie et une vitesse en dysharmonie avec leurs capacités biologiques. Pour mieux mesurer les risques encourus par ces espèces, il est nécessaire de rappeler les traits biologiques les plus pertinents de leurs stratégies de vie et les caractéristiques des populations et des communautés découlant de ces « traits biologiques ». En effet, la conjonction de ces caractères avec une anthropisation, croissante et diversifiée, confère à ces communautés, *a priori* fragiles, une vulnérabilité indéniable.

Outre la disparition des organes visuels, s'accompagnant du développement de structures sensorielles compensatoires, les organismes stygobies sont caractérisés par un métabolisme très bas, et en conséquence, par des cycles de reproduction extrêmement longs et « dilatés » dans le temps (Figure 1) par comparaison avec les organismes de surface. La figure 2 en fournit un exemple avec le crustacé décapode du genre *Troglocaris*, forme emblématique du massif des Cent Fonts et des karsts avoisinants (Vigneux *et al.*, 1993). En outre, l'accomplissement du cycle de développement de certains groupes de crustacés (Syncarides) est difficile et comporte un risque de mortalité qui devient particulièrement élevé lors des nombreuses mues (8 à 11 stades post-embryonnaires, Coineau, 1998). Les stygobies ont opté pour une durée de vie longue (jusqu'à 30 ans chez l'Amphipode *Niphargus* contre seulement 2 ans chez le *Gammarus*, Amphipode des eaux de surface, Figure 1), mais aussi sur la production d'un faible nombre de descendants (jusqu'à 1 seul œuf par ponte chez les Syncarides, Coineau, 1998), avec une énergie consacrée à une protection souvent plus importante des jeunes. Ainsi, chez les « grands » crustacés (Isopodes, Amphipodes), l'expulsion des jeunes se fait, non sous la forme d'un œuf, mais sous la forme d'une larve à un stade de développement parfois relativement avancé. Durant son développement le jeune reste protégé par la femelle dans un marsupium ventral. La destruction des femelles entraîne donc celle d'une partie de la descendance. On se rend donc compte que les stratégies de vie des stygobies sont basées sur une relative constance du milieu souterrain.

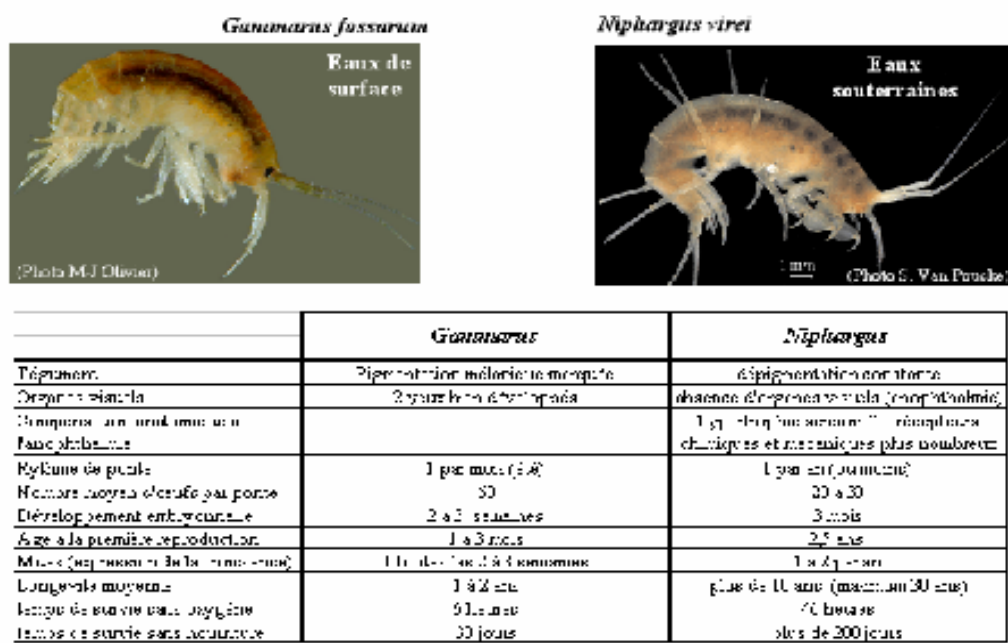


Figure 1: Comparaison de quelques caractéristiques morpho-anatomiques et métaboliques de deux crustacés Amphipodes dont l'un (*Gammarus*) vit dans les eaux de surface et l'autre (*Niphargus*) colonise les eaux souterraines (modifié d'après Ginet et Decou, 1977)

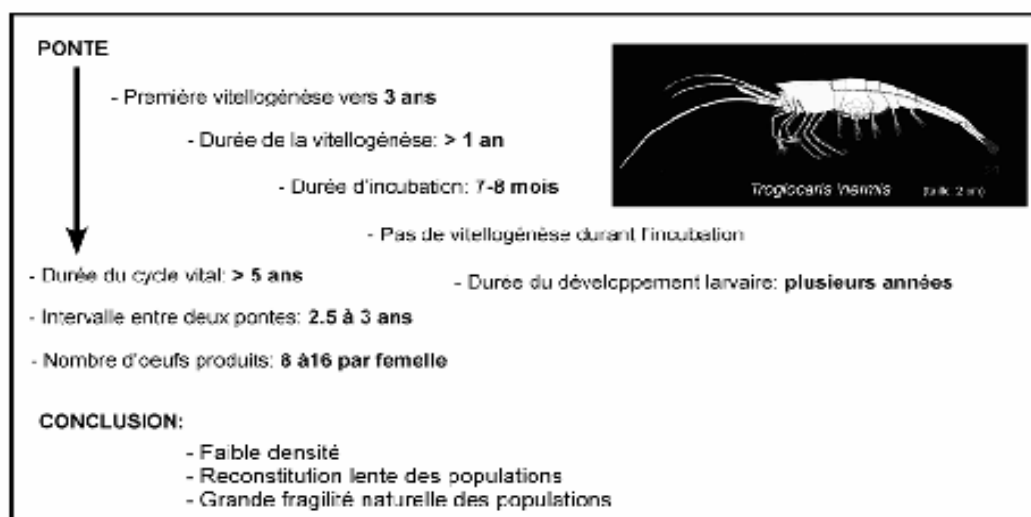


Figure 2: Paramètres majeurs du cycle biologique du Crustacé Décapode *Troglocaris* (d'après Juberthie-Jubeau, 1974, 1975)

En conséquence de ces traits biologiques, l'abondance des espèces stygobiontes demeure faible. Rapportée au volume de l'aquifère la densité des populations est même extrêmement basse, même si localement on peut récolter, à proximité des flux de nourriture ou à l'interface avec les milieux de surface, des individus en très grand nombre et même parfois pour certaines espèces (ex. *Niphargus virei*), des formes de pullulement (Sinton, 1984).

Comme toute autre espèce, chacune des formes stygobies est caractérisée par une aire de distribution qui lui est propre et en dehors de laquelle elle est absente. Cette aire de distribution est contrôlée par la valence écologique de l'espèce (ensemble des caractéristiques environnementales en adéquation avec son développement) et par ses capacités de dispersion. Les capacités de dispersion sont elles-mêmes liées à la biologie de l'espèce (fécondité), à sa mobilité (propagation active) ou à une propagation passive, comme la dispersion d'amont en aval d'une rivière par l'écoulement du flux d'eau, ou les phénomènes de phorésie (processus par lequel un invertébré s'attache à un organisme pour émigrer d'un site à un autre). La mobilité des organismes souterrains est très variable d'un groupe systématique à l'autre. Ainsi chez les macro-crustacés de nombreuse formes sont pratiquement aussi mobiles que leurs homologues de surface (Isopodes, Amphipodes), mais les capacités de dispersion passives sont très réduites par rapport à ce que l'on observe en surface, en raison de la forte fragmentation qui caractérise les réseaux souterrains (surtout les réseaux karstiques). Cette faible connectivité se traduit par un compartimentage et un isolement de différentes populations d'une même espèce. Puis au fil du temps, par des phénomènes de spéciation elle aboutit à la formation d'espèces distinctes et à distribution géographique très étroite (espèces endémiques). L'environnement souterrain est celui qui comporte le plus fort taux d'endémisme au monde (Gibert & Deharveng, 2002). En France plus de 70% des espèces sont endémiques de France (Ferreira *et al.*, sous presse) et la proportion d'endémiques *stricts* (espèces présentes sur un seul site) est maximale dans les régions méridionales (Dole-Olivier *et al.*, 2005).

1.3.2. Implications en termes de vulnérabilité des populations et de protection des espèces

Ces caractéristiques écologiques ont des implications très fortes en termes de gestion du patrimoine biologique: la plupart des stygobies sont des espèces vulnérables et à distribution géographique très réduite, le phénomène étant accentué dans les régions méridionales et périméditerranéennes. La logique voudrait donc que la majorité de ces espèces soient protégées, mais dans la pratique, la mise en application de telles propositions serait irréaliste en raison des conflits d'usage qu'elles ne manqueraient pas de générer. La prise en compte de la vie existant sous terre, celle de la qualité biologique des aquifères et de leur éventuelle valeur patrimoniale n'est que très récente (Creuzé des Châtelliers *et al.*, 1991; Guillemin *et al.*, 1991). Des recherches se développent actuellement vers la proposition de textes européens visant à prendre en compte la qualité biologique des aquifères, tout en préservant les usages de l'eau (Gibert, 2001; Gibert *et al.* 1991; Danielopol *et al.*, 2004) car il n'existe pas à ce jour de législation concertée pour la protection de ces milieux; seules de rares initiatives individuelles (Juberthie, 1995) jalonnent ces avancées.

La liste des espèces de mollusques protégées sur le territoire national par la loi de 1976 et les arrêtés subséquents, proposée par Bouchet 1990 et revue pour la taxonomie par Falkner *et al.* 2002, compte pour moitié des espèces de mollusques stygobies. Elles sont également inscrites sur la liste des espèces déterminantes pour la désignation des ZNIEFF. Les espèces suivantes sont présentes aux Cent Fonts et justifient la désignation du ZNIEFF (en l'occurrence l'intégration à la liste des espèces de la ZNIEFF existante): *Bythiospeum bourguignati*, *Heraultiella exilis*, *Paladilhia pleurotoma*, *Bythinella* sp.

La nouvelle version des cahiers d'Habitats (Bensettiti & Herard-Logereau 2004) décline l'habitat n° 8310 « milieu souterrain » en quatre sous-ensembles que sont les grottes à

chauves-souris, le réseau d'interstices, le milieu souterrain superficiel et les zones noyées des karsts (8310-4). Les indicateurs pour cet habitat sont les crustacés et mollusques stygobies. Le réseau des Cent Fons est donc un habitat naturel d'intérêt communautaire au sens de la Directive Habitats qui prélude à l'établissement du réseau Natura 2000. Etant inclus dans un périmètre Natura 2000, cet habitat doit être pris en compte dans le cadre de l'élaboration du Document d'Objectifs correspondant à ce site.

1.4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

1.4.1. Échantillonnage prévu

Le protocole d'échantillonnage initial de suivi de la faune stygobie comporte chronologiquement trois phases (Tableau 1):

- (1) un inventaire faunistique du massif avant pompage,
- (2) une évaluation qualitative et quantitative de la faune extraite du massif au cours des pompages,
- (3) un inventaire faunistique du massif après pompage. Idéalement, les inventaires faunistiques avant et après pompage comprennent chacun:
 - un inventaire de la faune des sources et des cavités pénétrables,
 - un suivi de crue,
 - un inventaire de la faune hyporhéique de l'Hérault (*hyporhéos* = communauté d'organismes colonisant le sous-écoulement des cours d'eau) qui a été rajouté au protocole en raison des contacts potentiels entre l'aquifère des Cent Fonts et le lit du fleuve. Ces échantillons permettront tout d'abord de savoir si la zone hyporhéique du cours d'eau contribue à la richesse et à la valeur patrimoniale du site. D'autre part, en cas d'intrusion des eaux de surface dans le karst, une comparaison qualitative de la faune introduite par ces eaux avec celle de la zone hyporhéique devrait fournir quelques éléments permettant de savoir si elles ont été préalablement filtrées par les sédiments du lit du cours d'eau (passage à travers la zone hyporhéique).

Le protocole d'échantillonnage a été négocié entre l'Université Lyon 1, le BRGM et le CG 34 le 5 avril 2005, date à partir de laquelle il n'y a eu aucune précipitation sur le bassin versant de la source des Cent fonts, jusqu'à celle survenue début septembre au cours du pompage expérimental. Le suivi de crue antérieur aux essais de pompage n'a donc pas été réalisé.

1.4.2. Echantillonnage réalisé

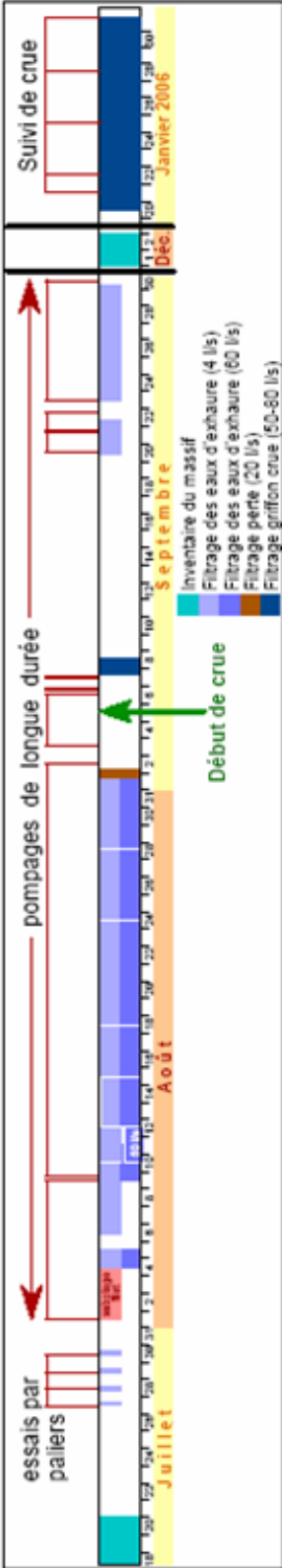
(1) L'inventaire faunistique du massif avant pompage a été réalisé les 18 et 19 juillet 2005. L'échantillonnage de la zone hyporhéique de l'Hérault a été effectué le 19 Juillet alors que le cours d'eau était en étiage. Cette période est normalement très propice à la récolte des espèces stygobies vivant dans la zone hyporhéique (Marmonier et Dole, 1986, Dole-Olivier et Marmonier, 1992).

(2) L'évaluation qualitative et quantitative de la faune extraite du massif a été réalisée en parallèle au protocole de pompage mis en oeuvre par le BRGM du 27-07 au 30/09 (Tableau 2):

Tableau 1: Suivi de l'impact du pompage sur les communautés de la faune cavernicole des Cent Fonts; protocole prévu par l'avenant n°1 à la convention d'application de la convention cadre pour l'assistance scientifique et technique pour la connaissance et la gestion des eaux souterraines karstiques du système des Cent Fonts (programme 2003-2004).

QUESTION	Inventaire faunistique du massif (fillet surber)		Evaluation de la dérive faunistique	vérification des stocks
REPONSE	Inventaire sources	Inventaire grotte	filtrages d'eau de pompage	Filtrages source en crue
AVANT pompage	3	1		
PENDANT période de pompage			4+6	
APRES pompage	3	1		2
nombre d'échantillons	6	2	10	2
TOTAL:				20 échantillons

Tableau 2: Chronologie de l'échantillonnage de la faune stygobie du massif des Cent Fonts



- un échantillon lors de chaque essai par palier (soit un à 200 l/s, un à 300 l/s, un à 500 l/s et un à 400 l/s). Les prélèvements sont collectés par sous-échantillonnage d'un débit de 4-5 l/s)

- filtrage pratiquement ininterrompu des eaux issues du pompage en continu de 400 l/s. Lors de ces pompages deux types d'échantillons ont été réalisés simultanément, l'un filtrant un débit de sous-échantillonnage de 4 l/s et le second filtrant un débit de sous-échantillonnage de 60 l/s.

Une interruption dans ce protocole de filtrage est à noter du 1^{er} au 4 août 2005 en raison d'un acte de vandalisme qui a provoqué la mise à sec des filets.

(3) L'inventaire faunistique du massif après pompage a été réalisé les 1^{er} et 2 décembre 2005 pour ce qui concerne la cavité pénétrable et les sources. Le débit de l'Hérault à cette période, bien que proche de celui de l'étiage, n'a pas permis un échantillonnage de la faune hyporhéique, la vitesse du courant et la hauteur d'eau ne laissant pas un libre accès à l'intérieur du chenal. Le suivi de crue postérieur aux essais de pompage s'est déroulé du 20 au 28 janvier 2006 après un fort épisode neigeux. Il avait été proposé de ne pas échantillonner trop rapidement à la suite des essais de pompage et des crues de septembre et octobre, afin de respecter un temps de résilience probable des communautés après ces perturbations. Ces chutes de neige ont provoqué une crue de moyenne amplitude. L'échantillonnage est constitué de cinq prélèvements (filtrages en continu) de l'exutoire principal (station de jaugeage du BRGM). Il est intervenu plusieurs jours après la première montée des eaux dans le karst, ce qui ne correspond pas à une chronologie optimale pour un suivi de crue (voir résultats).

C'est donc un total de 42 échantillons qui a été réalisé pour ce suivi dans lequel 35 prélèvements (au lieu des 20 échantillons prévus) ont été examinés, traités et sont présentés dans ce rapport. La fiche contrôle de cet échantillonnage fait l'objet de l'annexe 1.

1.5. METHODOLOGIE, PRELEVEMENTS, ANALYSE

1.5.1. Inventaires

Par principe un inventaire cherche à recenser le plus grand nombre d'espèces présentes. Plusieurs techniques ont donc été mises en œuvre simultanément car elles ne sont pas exhaustives utilisées isolément, mais favorisent chacune la capture d'un certain type d'organismes. Les techniques de pompages «Bou-Rouch», le filet «surber», et les filtrages ont été utilisés dans les sources; celles des appâts (balances), de la chasse à vue, du filet «surber» et des pompages «Bou-Rouch» dans les cavités pénétrables (Figure 3). La chasse à vue n'a pas fourni de résultats, aucun organisme n'ayant été observé lors des visites. Tous les griffons (une dizaine) ont été explorés et prélevés; les échantillons ont été regroupés par type (surber, filtrages, pompages) pour constituer chaque fois un seul échantillon. Pour les Mollusques des prélèvements supplémentaires de sédiments ont été effectués dans les sources et directement en milieu souterrain. L'échantillonnage de la zone hyporhéique de l'Hérault est réalisé par pompage Bou-Rouch après insertion d'un tube crépiné à 50 cm sous la surface des sédiments et filtrage du «liquide» aspiré. Deux stations, situées en aval de chacun des seuils qui encadrent le secteur d'étude, ont été sélectionnées. Le positionnement des stations en aval des seuils correspond classiquement à une zone de concentration des espèces stygobies (Dole-Olivier et Marmonier, 1992). Dans chaque station trois replicats (= trois points de pompage) ont été réalisés. Ils correspondent chacun à l'aspiration d'un volume de 10 litres et permettent de prendre en compte l'hétérogénéité locale de distribution des organismes.

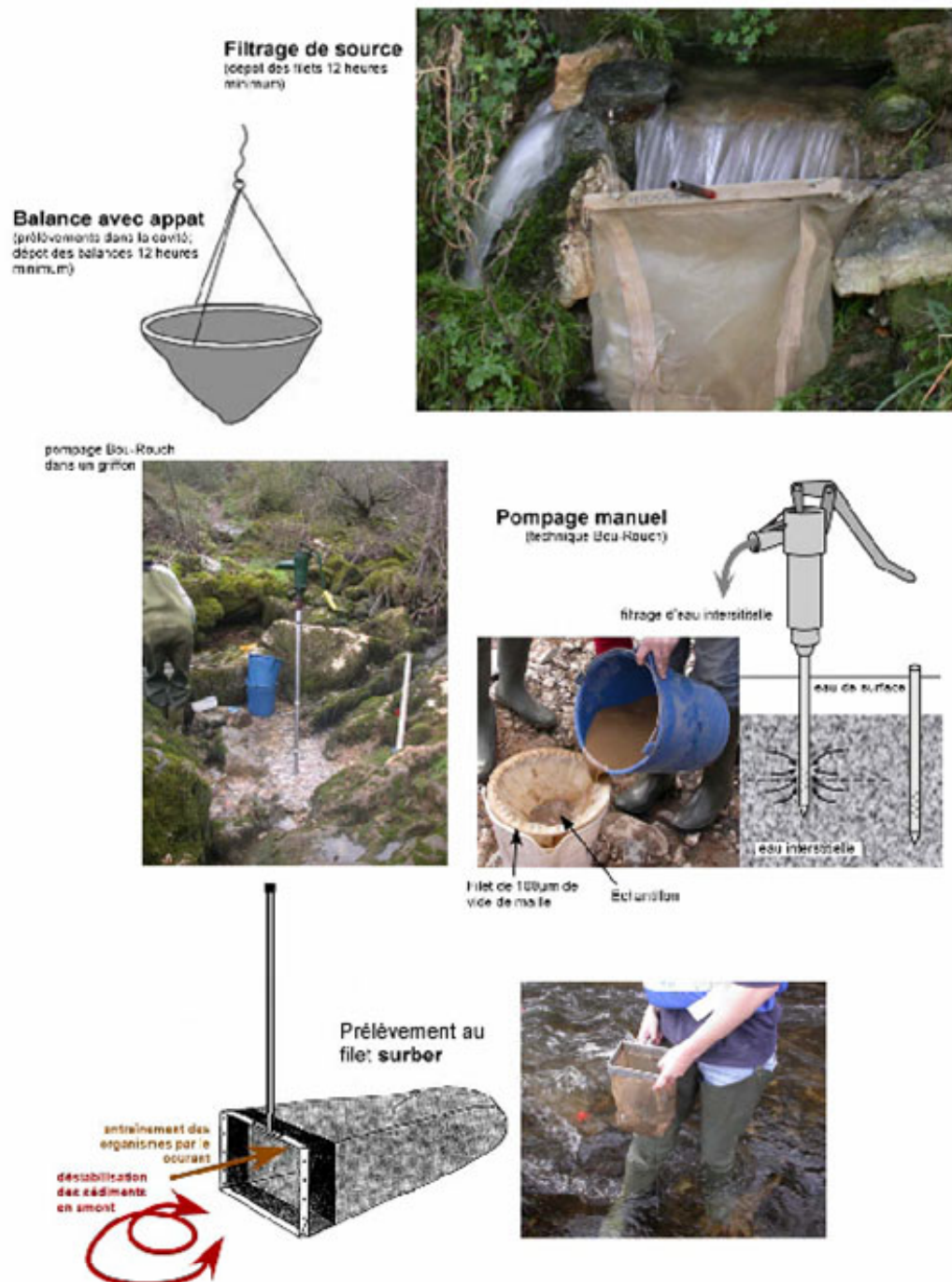


Figure 3: Techniques d'échantillonnage de la faune stygobie, utilisées pour le suivi hydrobiologique.

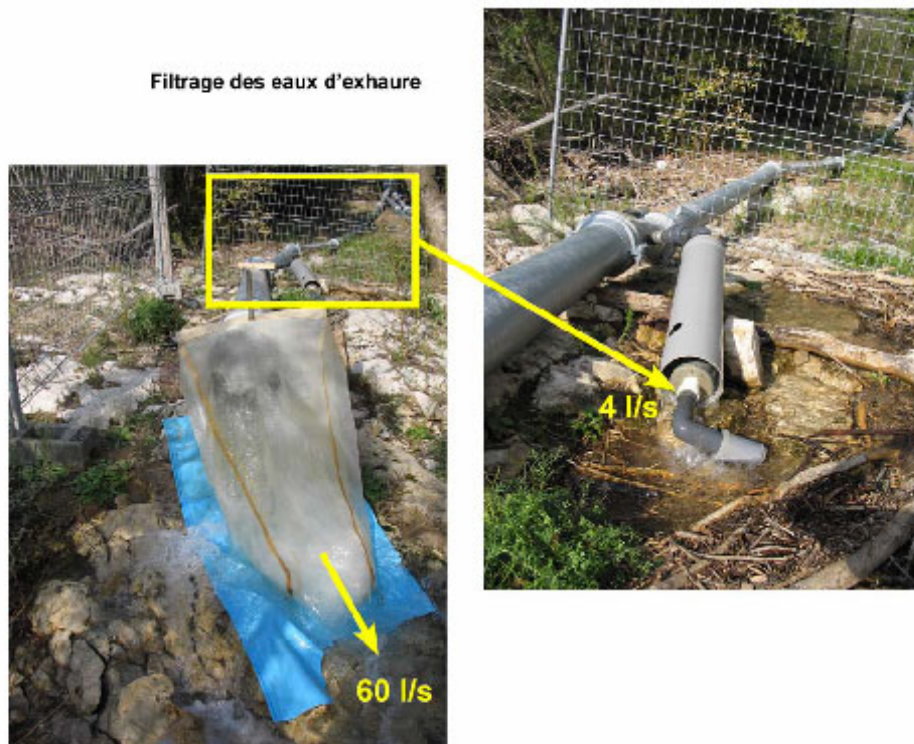


Figure 4: Echantillonnage en continu de la faune extraite par les eaux d'exhaure: dispositif de filtration (Cliché C. Bou)

Le vide de maille des filets utilisés varie de 100 à 150 µm, les filets à 100µm n'étant en général pas utilisables pour les filtrages de crue à cause de problèmes de colmatage des vides qui rendent l'échantillonnage inefficace.

1.5.2. Filtrages en continu de la faune extraite lors du pompage d'essai

Deux dérivations ont été mises en place sur l'un des trois conduits des eaux d'exhaure, l'une permettant de filtrer un débit de 4 l/s et le second un débit de 60 l/s (Figure 4). Ce double échantillonnage permet de pallier d'éventuels aléas techniques ou apporter, si nécessaire, des compléments d'information. L'examen exhaustif de ce double échantillonnage étant hors contrat, la variabilité de l'échantillonnage n'a pas été prise en compte. La dérivation à 4l/s est équipée d'un système filtrant protégé permettant un échantillonnage prolongé. Les eaux d'exhaure étaient non turbides; en conséquence les filets n'ont subi aucun colmatage.

1.5.3. Analyse des échantillons

Le dépouillement des échantillons est un processus long et fastidieux. L'échantillon doit être fractionné en très petites quantités et entièrement observé sous stéréo-microscope, de manière à extraire un à un et classer par groupe taxonomique tous les organismes présents. La taille des spécimens peut être supérieure au cm (*Niphargus*, *Troglocaris*), mais elle est plus fréquemment de quelques millimètres (*Proasellus*), de l'ordre du mm (*Salentinella*, *Ingolfiella*), voire inférieure au mm (genre *Pseudectinosoma*). Certains genres sont directement identifiés à l'espèce au laboratoire (Isopodes, Amphipodes), d'autres ont fait l'objet d'envois dans d'autres universités, toutes les compétences taxonomiques n'étant pas disponibles dans un seul laboratoire. La majorité des identifications nécessite une dissection des spécimens et une observation des pièces disséquées au microscope. G. Magniez (Université de Bourgogne) a participé à l'identification de certains Isopodes, P. Marmonier (Université de Rennes) a assuré l'identification des Ostracodes et D. Galassi (Université de l'Aquila, Italie) a réalisé l'identification des Cyclopoides et Harpacticoides.

Les prélèvements de sédiments pour les Mollusques ont été traités par séchage, immersion et récolte du surnageant, puis tri sous la loupe binoculaire. Certains taxons difficiles ont bénéficié d'une analyse morphométrique.

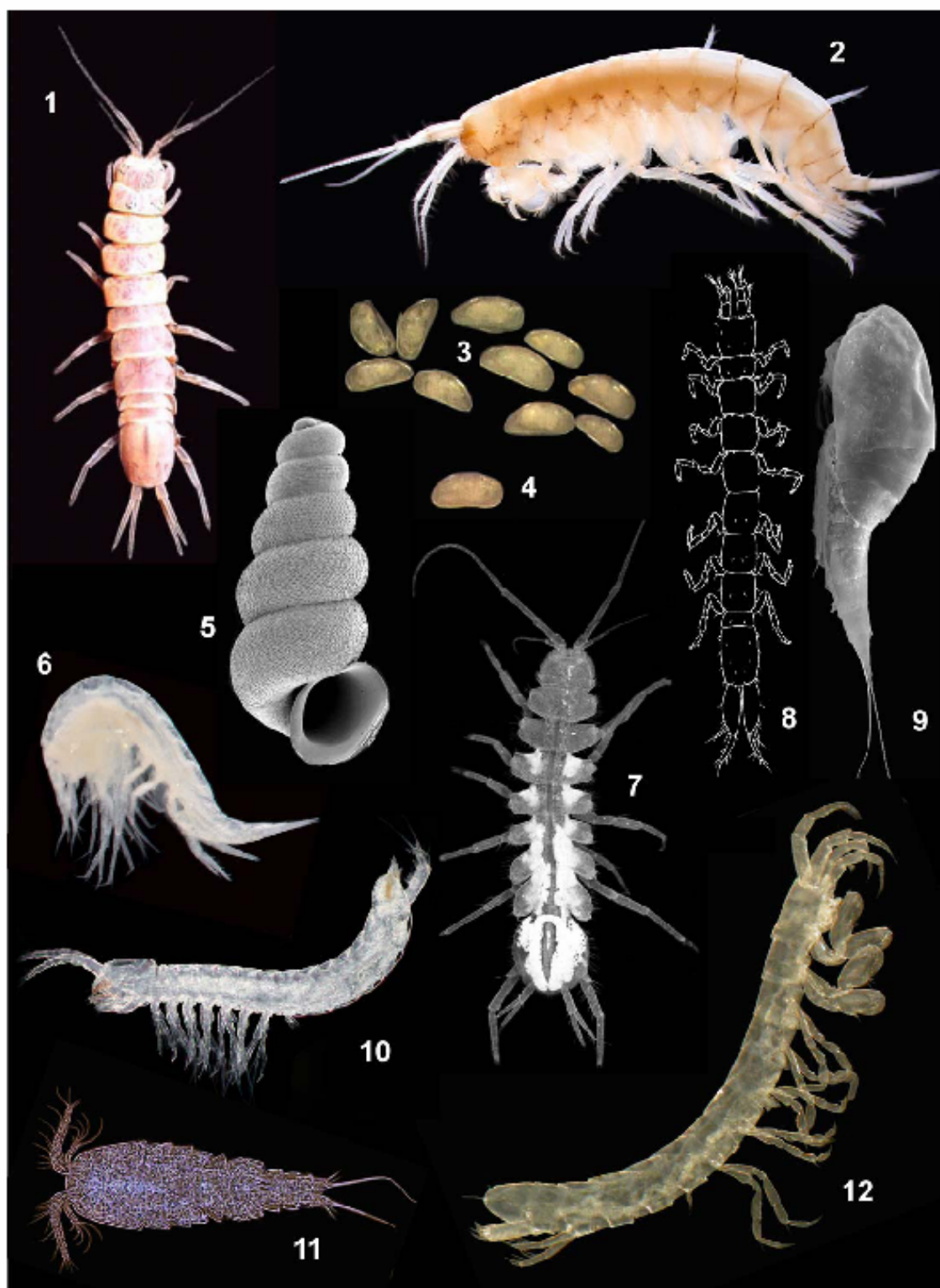
1.5.4. Niveaux de détermination taxonomique

Dans toute étude écologique, c'est la nature et/ou la précision de la question posée qui détermine le niveau d'identification taxonomique. Sur l'aspect «inventaire» (avant et après pompage), la précision des données à l'espèce s'impose puisqu'il s'agit de savoir si les espèces déjà inventoriées dans la littérature sont encore recensées aujourd'hui, éventuellement si de nouvelles espèces sont collectées sur le site et enfin si cet assemblage est reconstitué après le pompage expérimental. Ce degré de précision au niveau spécifique ne concerne que les stygobies. Mais comme indiqué en introduction, une partie de la faune récoltée est non-stygobie («épigée³»), et constitue une fraction importante des échantillons, particulièrement dans les sources. Le tri entre faune stygobie et non-stygobie est très facile et immédiat pour certains groupes présentant des caractères stygomorphes évidents (Crustacés Isopodes, Amphipodes, Syncarides), ou pour des groupes ne renfermant pas d'espèces stygobies, du moins dans la zone d'étude (larves d'insectes, Crustacés Cladocères).

³ Espèce épigée: espèce caractéristique des eaux de surface

Planche 1: Quelques représentants de la faune stygobie du massif des Cent Fonts:

- 1 - *Stenasellus buili* (Crustacé Isopode, taille 1cm), photo G. Magniez.
- 2 - *Niphargus virei* (Crustacé Amphipode, taille 2cm), photo MJ Olivier.
- 3 - *Schellencandona cf. simililampadis* (Crustacé Ostracode, taille 0.9mm), photo P. Marmonier.
- 4 - *Fabaeformiscandona cf. breuili* (Crustacé ostracode, taille 0.9mm), photo P. Marmonier.
- 5 - *Moitessieria sp. nov.* (Mollusque Moitessieridae, taille 1mm), photo V. Prié.
- 6 - *Salentinella angelieri* (Crustacé amphipode, taille 2mm), photo MJ Olivier.
- 7 - *Proasellus cavaticus* (Crustacé isopode, taille 7-8mm), photo J-P. Henry.
- 8 - *Microcharon doueti* (Crustacé isopode, taille 1-2mm), dessin N. Coineau.
- 9 - *Pseudectinosoma vandeli* (Crustacé copepode Harpacticoide, taille 0,3mm), photo D. Galassi
- 10 - *Parabathynella stygia* (Crustacé Syncaride, taille 1,5 mm), photo T. Lefebure. (Aquifère de Sauve)
- 11 - *Graeteriella (Graeteriella) unisetigera* (Crustacé copepode Cyclopoide, taille 0.5mm), photo T. Datry.
- 12 - *Ingolfiella thibaudi* (Crustacé amphipode, taille 2mm), photo MJ Olivier.



Mais il est beaucoup plus délicat pour d'autres groupes renfermant les différentes catégories écologiques mais ne présentant pas de stygomorphie évidente. C'est le cas des groupes de Crustacés Cyclopoides, Harpacticoides et Ostracodes ainsi que du groupe des Mollusques. Dans ce cas, tous les individus sont identifiés à l'espèce. Ainsi pour une même question, et pour des raisons techniques, le niveau de détermination varie d'un groupe taxonomique à l'autre (Annexe 3). Le dénombrement des groupes non-stygobies (larves d'insectes) ne présentant pas d'intérêt n'a pas été réalisé. Leur abondance a été évaluée en 4 classes (*rare: 1 individu, **commun: 1-10 individus; *** abondant: 10-100 individus, ****très abondant: >100 individus...)

Remarque: ces données ne sont exploitables que *qualitativement* car les techniques d'échantillonnage instantané ne fournissent en aucun cas une évaluation fiable de la densité d'organismes ou de la taille des populations vivant dans le massif. Seule l'abondance relative, qui permet de mettre en évidence la dominance ou la rareté de certaines formes, peut être prise en compte.

Pour ce qui concerne le filtrage des eaux d'exhaure, on cherche d'une part à quantifier la faune stygobie extraite du massif, d'autre part à identifier une éventuelle contamination par les eaux de surface. On rencontre donc les mêmes exigences pour l'identification des groupes des Cyclopoides, Harpacticoides, Ostracodes et Mollusques, obligeant à un examen de tous les individus. La nature de la contamination (faune hyporhéique, benthique ou planctonique) pourra être précisée à partir de ces groupes et des groupes entièrement stygoxènes.

1.6. RESULTATS

1.6.1. Inventaire général des espèces stygobies récoltées aux Cent-Fonts

Un total de 36 espèces stygobies a été recensé dans les 35 échantillons analysés lors de cette campagne 2005-2006. Cette valeur, qui peut sembler *a priori* faible dans un système autotrophe, est en fait particulièrement élevée dans le cas d'un système souterrain (Danielopol & Pospisil, 2001). En effet, même si les connaissances sur la biodiversité souterraine sont hétérogènes de par le monde, une telle diversité locale est rarement atteinte et ces résultats confortent les travaux de Culver & Sket (2000) qui ont placé l'aquifère des Cent Fonts parmi les 20 systèmes karstiques les plus riches au monde.

Une comparaison de ces données récentes avec des synthèses antérieures tirées de la base de données du laboratoire d'HydroBiologie et Ecologie Souterraines de l'Université de Lyon (HBES) est présentée dans le Tableau 3. On soulignera:

- d'une part, que 6 des espèces préalablement recensées dans les études passées n'ont pas été capturées, parmi lesquelles des crustacés de grande taille, tels l'isopode *Sphaeromides raymondi*, (endémique de la région nord-montpelliéraine et de l'Ardèche) et des formes de plus petite taille comme l'ostracode *Sphaeromicola cebennica juberthiei*, et le cyclopoïde *Graeteriella (Paragraeteriella) vandeli*, tous deux endémiques stricts (in Ferreira, 2005).
- d'autre part près de 20 espèces nouvelles pour le site ont été identifiées, appartenant surtout au groupe des Amphipodes, des Ostracodes et des Mollusques. Cette forte augmentation du nombre d'espèces répertoriées est liée au fait que lors des prospections effectuées par Rouch et al. (1968), l'accent avait été mis sur les espèces de grande taille et sur les copépodes. D'autres groupes comme celui des Mollusques

et des Ostracodes avaient été moins étudiés, sans doute en raison de l'absence de spécialistes.

- enfin il est important de noter que 3 espèces de Mollusques sont dites «nouvelles pour la science» (notées n. sp. c.à.d, *novae species*, description en cours) et que 4 espèces de Crustacés, soit 2 Amphipodes (*Niphargus gallicus* et *Niphargus kochianus*) et 2 Ostracodes (*Pseudocandona zschokkei* et une «Candoninae triangulaire»), n'ont pas été récoltées directement dans le massif karstique mais dans la zone l'hyporhéique de l'Hérault en connexion avec le karst. Enfin le groupe des Oligochètes, pouvant renfermer quelques espèces additionnelles, n'a pas encore été examiné (leur identification à l'espèce est hors contrat).

En conclusion ce premier inventaire porterait à 44 le nombre total d'espèces recensées (annexe 4), c'est-à-dire potentiellement présentes sur le site, bilan qui positionnerait le système des Cent Fonts parmi les aquifères les plus riches au monde.

Tableau 3: Inventaire général des stygobies du karst des Cent Fonts.
Comparaison avec les données antérieures disponibles

Groupe	genre / espèce	nom d'auteur	inventaire bibliographique*	récoltes 2005-2006
HIRUDINEA	<i>Trocheta bykowskii</i>	Gedroy, 1913	X	
MOLLUSCA	<i>Bythinella n. sp.</i>	à décrire		X
GASTROPODA	<i>Bythiospeum bourguignati</i>	Paladilhe, 1866		X
	<i>Heraultiella exilis</i>	Paladilhe, 1867		X
	<i>Islamia moquiniana</i>	Dupuy, 1851		X
	<i>Moitessieria rollandiana</i>	Bourguignat, 1863		X
	<i>Moitessieria simoniana</i> **	Saint-Simon (1848)	X	X
	<i>Moitessieria n.sp.1</i>	à décrire		X
	<i>Moitessieria n.sp.2</i>	à décrire		X
	<i>Paladilhia pleurotoma</i>	Bourguignat 1865		X
DECAPODA	<i>Troglocaris inermis</i>	Fage, 1937	X	X
ISOPODA	<i>Stenasellus bulii</i>	Remy, 1949	X	X
	<i>Proasellus cavaticus</i>	Leydig, 1871	X	X
	<i>Microcharon doueti</i>	Coineau, 1968	X	X
	<i>Faucheria faucheri</i>	Dollfus & Viré, 1900	X	X
	<i>Sphaeromides raymondi</i>	Dollfus, 1897	X	
AMPHIPODA	<i>Niphargus laisi</i>	Schellenberg, 1936		X
	<i>Niphargus gallicus</i>	Schellenberg 1935		X
	<i>Niphargus kochianus kochianus</i>	Bate 1859		X
	<i>Niphargus pachypus</i>	Schellenberg 1933		X
	<i>Niphargus virei</i>	Chevreaux, 1896	X	X
	<i>Salentinella angelieri</i>	Ruffo & Delamare-Deboutteville, 1952		X
	<i>Salentinella delamarei</i>	Coineau, 1962		X
	<i>Salentinella sp.</i>		X	
	<i>Ingolfiella sp.</i> ***		X	X
	<i>Ingolfiella thibaudi</i>	Coineau, 1968		X
OSTRACODA	<i>Fabaeformiscandona cf. breuili</i>	Paris, 1920		X
	<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>	Danielopol, 1978		X
	<i>Cryptocandona sp ?</i>			X
	<i>Pseudocandona zschokkei</i>	Wolf (1920)		X
	<i>Pseudocandona sp ?</i>			X
	<i>Candoninae triangulaire</i>			X
	<i>Sphaeromicola cebennica juberthiei</i>	Danielopol, 1977	X	
SYNCARIDA	<i>Clamoussella cf. delayi</i>	Serban, Coineau & Delamare, 1971	X	X
CYCLOPOIDEA	<i>Acanthocyclops rhenanus</i>	Kiefer, 1936	X	
	<i>Acanthocyclops venustus westfalicus</i>	(Kiefer, 1931)	X	X
	<i>Graeteriella (Paragraeteriella) vandeli</i>	Lescher-Moutoué, 1969	X	
	<i>Graeteriella (Graeteriella) unisetigera</i>	Graeter, 1910	X	
	<i>Graeteriella (Graeteriella) cf. boui</i>	Lescher-Moutoué, 1974	X	X
	<i>Kieferiella delamarei</i>	Lescher-Moutoué, 1976	X	X
	<i>Speocyclops racovitza</i>	Chappuis, 1923	X	
HARPACTICOIDA	<i>Pseudectinosoma vandeli</i>	Rouch, 1969	X	X
	<i>Ceuthonectes gallicus</i>	Chappuis, 1928	X	X
	<i>Elaphoidella leruthi meridionalis</i>	Chappuis, 1953	X	X
	<i>Nitocrella omega</i>	Hertzog, 1936		X
	<i>Nitocrella hirta hirta</i>	Chappuis, 1923	X	X
	NOMBRE TOTAL D'ESPECES		24	36

*liste modifiée d'après Rouch et al., 1968; Lescher-Moutoué, 1976; Malard et al., 1997 & Base de données HBES

**identification soumise à caution: correspondrait en fait à *Moitessieria n.sp.1*

*** vraisemblablement *Ingolfiella thibaudi*

L'aquifère des Cent Fonts n'est cependant pas le seul système dans la région Languedoc Roussillon à bénéficier d'une telle richesse en stygobiontes. Bien que la connaissance des espèces stygobies et de leur distribution soit encore très fragmentaire (Ferreira *et al.* sous presse), on dispose de données biologiques conséquentes sur deux autres aquifères, celui de Sauve et de la source du Lez, situés dans une zone géographique proche de celle des Cent Fonts. Ils constituent l'ensemble faunistique des karsts nord Montpellierains, également inscrits sur la liste des 20 «hotspots» mondiaux de la biodiversité stygobie (Culver & Sket, 2000).

Dans cet ensemble, le système du Lez apparaît comme le plus vulnérable (il fait partie de la sélection des 10 écosystèmes karstiques au monde les plus menacés par le «Karst Water Institute», WV, USA, Malard *et al.*, 1997). Ces trois aquifères rassemblent un total de 68 espèces (annexe 2). Une étude récente (Ferreira, 2005) basée sur une analyse de clusters (UPGMA) a montré que les communautés du Lez et des Cent Fonts sont faunistiquement très proches, alors que celle de Sauve présente de plus fortes similitudes avec les communautés de l'Ardèche et du Chassesac, pourtant beaucoup plus distantes géographiquement. De plus, si on examine la distribution des 68 espèces dans les trois aquifères, on se rend compte que 61% d'entre elles (42/68, cf. annexe 2) sont présentes dans un seul des trois aquifères, ce qui souligne la forte complémentarité de ces trois unités qui de ce fait ne sont pas interchangeables.

1.6.2. Faune extraite lors des pompages

Les résultats exhaustifs de l'échantillonnage figurent dans l'annexe 3 et sont présentés suivant l'ordre établi par le protocole. De ce tableau ont été extraits les échantillons correspondant aux essais par paliers et aux pompages en continu. Les données faunistiques ont été subdivisées en deux groupes, les stygobies d'une part, les non-stygobies d'autre part. Le nombre cumulé d'individus extraits est calculé séparément pour les essais par paliers et pour les pompages en continu (Tableau 4) et ce pour chacune des deux catégories d'organismes. Dans chaque cas la densité de dérive (nombre d'individus éjectés /m³) ont été calculés pour chaque échantillon (Tableau 5).

- STYGOBIES

Lors des pompages par paliers le nombre de stygobies récoltés est faible (au total 6 individus, dont 2 *Pseudectinosoma vandeli*, endémiques du massif et 1 *Troglocaris inermis*, Tableau 4, Annexe 3). Ajusté au débit réel (le débit filtré est en moyenne 100 fois plus faible que le débit réel), cette valeur devient plus conséquente (600 individus à la fin des 4 essais, soit 24 heures de pompage).

Le nombre de stygobies collectés à la fin des pompages en continu est de 876 individus. La pompe aspire majoritairement des copépodes (*Graeteriella cf. boui*, *Ceuthonectes gallicus*, *Pseudectinosoma vandeli*), l'Ostracode *Schellencandona cf. simililampadis* et plus rarement *Troglocaris inermis* (échantillons à 60l/s) et *Niphargus virei* (Annexe 3). Sur la base des données collectées il semble que la faune extraite par pompage soit qualitativement assez différente de la faune expulsée lors de la crue post pompage, la crue extrayant une plus grande variété d'organismes du massif. Cette comparaison est cependant délicate, les deux événements n'étant pas directement comparables (voir interprétation). Rapporté au débit réel, la dérive artificielle des stygobies atteint un total de 87 600 individus dont plus de 25% appartiennent à l'espèce endémique des Cent Fonts *Pseudectinosoma vandeli*.

- NON STYGOBIES

Tableau 4: Cumul du nombre d'individus extraits du massif lors des essais par paliers et du pompage de longue durée

n° échantillon	3A	3B	3C	3D	4A	4C	5A	5C	6A	6C	7A	7C	9A	9C
	Essais par paliers				Pompages en continu									
débit réel (l/s)	200	300	500	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
débit filtré (l/s)	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
nombre d'individus récoltés														
Stygobies	0	3	0	3	179	133	58	69	41	83	41	34	227	11
non-stygobies	0	3	4	8	97	3122	720	1795	2808	3643	2754	2582	96	14425
cumul des résultats bruts														
Stygobies	0	3	3	6	179	312	370	439	480	563	604	638	865	876
non-stygobies	0	3	7	15	97	3219	3939	5734	8542	12185	14939	17521	17617	32042
cumul des résultats ajustés au débit réel														
Stygobies	0	180	375	600	17900	31200	37000	43900	48000	56300	60400	63800	86500	87600
non-stygobies	0	180	875	1500	9700	321900	393900	573400	854200	1218500	1493900	1752100	1761700	3204200

Tableau 5: Evolution de la densité de dérive de la faune stygobie et non-stygobie au cours des essais par paliers et du pompage de longue durée

n° échantillon	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	5A	5B	5C	6A	6C	7A	7C	9A	9C
	Essais par paliers				pompages longue durée											
200 l/s	300 l/s	500 l/s	400 l/s	4 l/s	60 l/s	4 l/s	4 l/s	4 l/s	80 l/s	4 l/s	4 l/s	4 l/s	4 l/s	4 l/s	4 l/s	4 l/s
STYGOBIES																
nombre d'individus récoltés	0	3	0	3	179	30	133	58	69	69	41	83	41	34	227	11
débit filtré (l/s)	5	5	4	4	4	60	4	4	60	4	4	4	4	4	4	4
durée de filtrage (heures)	2	6	6	6	22	23	96	48	48	72	72	144	96	96	48	164
volumé théorique filtré (m3)	36	108	86,4	86,4	316,8	4968	1382,4	891,2	10368	1036,8	1036,8	2073,6	1382,4	891,2	2361,6	
Densité de dérive (ind/m3)	0	0,0278	0	0,0347	0,565	0,006	0,0962	0,0639	0,0067	0,0666	0,0395	0,04	0,0297	0,0246	0,3284	0,0047
NON-STYGOBIES																
nombre d'individus récoltés	0	3	4	8	97	1899	3122	720	2514	1795	2808	3643	2754	2582	96	14425
débit filtré (l/s)	5	5	4	4	4	60	4	4	60	4	4	4	4	4	4	4
durée de filtrage (heures)	2	6	6	6	22	23	96	48	48	72	72	144	96	96	48	164
volumé filtré (m3)	36	108	86,4	86,4	316,8	4968	1382,4	891,2	10368	1036,8	1036,8	2073,6	1382,4	891,2	2361,6	
Densité de dérive (ind/m3)	0	0,0278	0,0463	0,0926	0,3062	0,3822	2,2594	1,0417	0,2425	1,7313	2,7083	1,7568	1,9922	1,8678	0,1399	6,1091

Le niveau de détermination étant hétérogène d'un groupe taxonomique à l'autre, le groupe des non-stygobies rassemble sans distinction les deux catégories écologiques restantes (voir introduction), les stygophiles (résidents occasionnels) et les stygoxènes (hôtes accidentels, indicateurs d'une intrusion d'eau de surface).

Lors des pompages par paliers de débit, les éléments exogènes apparaissent en très faible nombre mais cette apparition est très rapide, comme en témoigne la présence du genre *Gammarus* lors du 2^{ème} essai (300l/s), soit 4 heures après de début de l'expérimentation. Ajusté au débit réel, le nombre de stygoxènes récoltés représente 1500 individus pour 24h, soit plus du double des stygobies. Au cours des pompages en continu, la densité de dérive varie de 0.14 à 6.1 individus/m³ (Tableau 5). Elle ne se stabilise pas au cours du temps. Ces densités de dérive ne seront pas discutées plus en détail car les calculs présentés ne tiennent pas compte des nombreuses larves d'insectes qui pénètrent dans le massif par le lit de l'Hérault et sont ensuite collectées par la pompe (Annexe 3). L'identification et le dénombrement de ces larves d'insectes n'ont pas été réalisés en raison de leur forte abondance et du peu d'information supplémentaire qu'apporterait une telle précision. A la fin des opérations de pompage en continu, les pompes ont évacué plus de trois millions d'épigrés (larves d'insectes non comprises). Les larves d'insectes récoltées appartiennent aux groupes des Hémiptères, Trichoptères, Ephéméroptères, Diptères Chironomidae et Odonates.

Outre l'aspect quantitatif de cette contamination, on notera la présence singulière de nombreuses formes n'appartenant pas aux communautés benthiques⁴ telles que les larves d'*Atyaephyra desmaresti* (Crustacé décapode), les larves d'*Argulus* (copepode parasite de poissons) ou des formes plus spécifiques des milieux stagnants tels que les copépodes *Moraria pectinata* et *Thermocyclops crassus*.

La présence de ce type de faune dans les eaux d'exhaure indique que la contamination par le lit de l'Hérault est très rapide et se réalise par infiltration directe de la lame d'eau de surface sans aucune filtration préalable à travers les sédiments de la zone hyporhéique.

Si les nombreux filtrages effectués par Rouch *et al.* (1968) mentionnent la présence d'espèces non-stygobies (épigrés notamment chez les copépodes), ils ne signalent ni faune planctonique, ni larves d'insectes qui pourraient attester de l'influence d'une source faunistique exogène régulière, telles que les pertes de la Buèges dont le transit à travers le karst est long (10 km environ).

1.6.3. Inventaire comparatif PRE / POST pompages

Les inventaires pré et post pompages concernent la cavité et les sources. Seul l'inventaire post pompage comporte un suivi de crue.

- Sources et cavité

Remarque: il a été difficile dans le cadre de ce contrat, établi sur une durée limitée, de sélectionner des périodes d'échantillonnage *similaires* pour comparer les deux inventaires pré et post-pompage. Ainsi, sources et cavité ont été échantillonnées dans des conditions hydrologiques qui ne sont pas comparables, la période antérieure aux pompages correspondant à un étiage prononcé (fréquence de retour: 30 ans environ) et la période post-pompage étant plus favorable à la collecte des stygobies.

⁴ Communauté vivant sur le fond des cours d'eau.

L'ensemble des espèces récoltées au cours de ces campagnes d'échantillonnage ne se retrouve pas en totalité dans l'inventaire des sources et de la cavité (36 espèces dans l'inventaire sur un total de 44), soulignant le rôle complémentaire des suivis de crue. Les résultats apportés par l'échantillonnage de la faune hyporhéique montrent que de nombreuses espèces sont communes au massif proprement dit et au milieu souterrain poreux qui accompagne le cours d'eau, traduisant de très fortes connections entre les deux sous-systèmes. Ils soulignent donc l'importance de la zone hyporhéique et des systèmes poreux de fond de vallée pour l'estimation de la biodiversité stygobie. Ce résultat est conforme aux études récentes menées dans divers pays européens pour l'évaluation de la biodiversité des communautés stygobies en région karstique (Programme de recherches PASCALIS, Gibert, 2001). Comme souligné au § 1.6.1 la zone hyporhéique abrite aussi des espèces propres (interstitielles), dont l'ostracode *Pseudocandona zschokkei*, signalé dans les aquifères du Rhône et du Rhin. Ce milieu souterrain particulier n'est jamais pris en compte dans les inventaires de type ZNIEFF.

Tableau 6: Comparaison des inventaires effectués avant et après les pompages expérimentaux dans les sources et la cavité (données cumulées de tous les échantillons récoltés, présentées en abondance et en abondance relative).

Identification / protocole	inventaire massif					
	Abondance dans les échantillons			abondance relative		
	Hyporhéique	Massif		Hyporhéique	AVANT	APRES
MOLLUSQUES		AVANT	APRES		12,17	8,07
	GASTROPODA	14	26		0,87	
	<i>Moitessieria rolandiana</i>	1			0,87	
	<i>Moitessieria n. sp. 1</i>	1			44,35	22,05
	<i>Moitessieria n. sp. 2</i>	51	71		1,74	0,31
CRUSTACEES	<i>Bythinella n. sp.</i>	2	1			1,24
	<i>Heraultiella exilis</i>	4	4	1,02		3,11
	<i>Bythiospeum bourguignati</i>					
	<i>Islamia moquiniana</i>	1	10			
	<i>Paladilhia pleurotoma</i>	1				
	<i>Acanthocyclops venustus westfalicus</i>	21	7	21,43		2,17
	<i>CycloPOIDA</i>	4	18	4,08	3,48	5,59
	<i>Graeteriella cf. boui</i>		6			1,86
	<i>Ceuthonectes gallicus</i>		23			7,14
	<i>Elaphoidella leruthi</i>		2			0,62
CRUSTACEES	<i>Nitocrella omega</i>		3			0,93
	<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>		4			1,24
	<i>Fabaeformiscandona cf. brevili</i>		5			1,55
	<i>OSTRACODA</i>					
	<i>Cryptocandona sp</i>	9		9,18		
	<i>Pseudocandona zschokkei</i>		4			1,24
	<i>Pseudocandona sp</i>	27		27,55		
	<i>Candoninae triangulaire</i>					
	<i>AMPHIPODA</i>					
	<i>Niphargus virei</i>	20	63		17,39	19,57
CRUSTACEES	<i>Niphargus laisi</i>	1	1		0,31	
	<i>Niphargus gallicus</i>	1		1,02		
	<i>Niphargus pachypus</i>	2	2	2,04		0,62
	<i>Niphargus kochianus kochianus</i>	2		2,04		
	<i>Niphargus (juvéniles indé.)</i>	18	7	18,37	0,87	2,17
	<i>Salentinella delamarei</i>	2			1,74	
	<i>Salentinella indé.</i>		2			0,62
	<i>Ingolfiella thibaudi</i>	3	1	3,06		0,31
	<i>ISOPODA</i>					
	<i>Proasellus cavaticus</i>	2			1,74	
CRUSTACEES	<i>Stenasellus buili</i>	1		1,02	0,87	
	<i>Faucheria faucheri</i>	15	53	9,18	13,04	16,46
	<i>Microcharon doueti</i>	9	9			2,80
abondance totale		98	115	100%	100%	100%
Richesse spécifique		12	13			

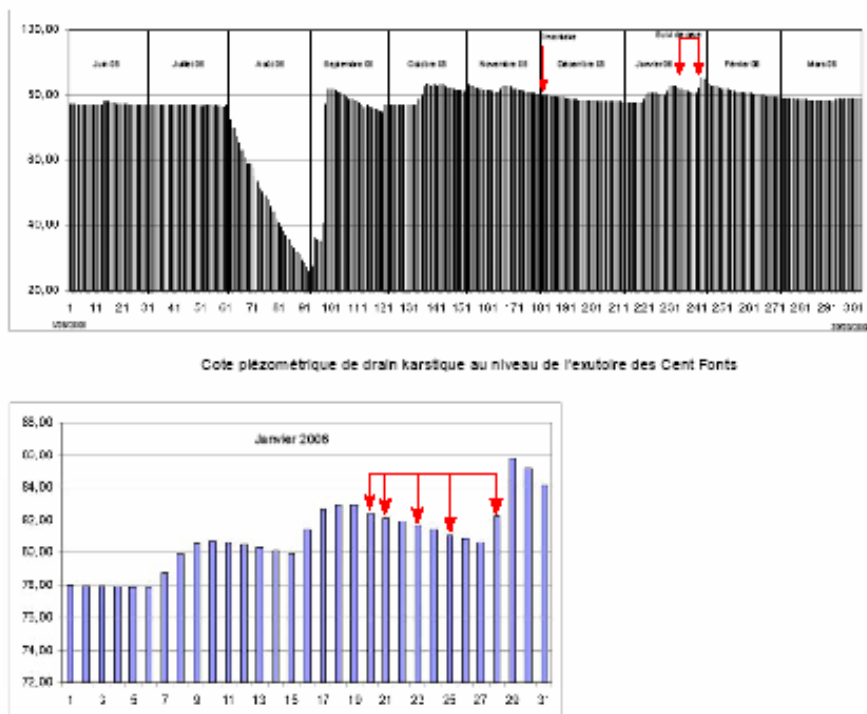
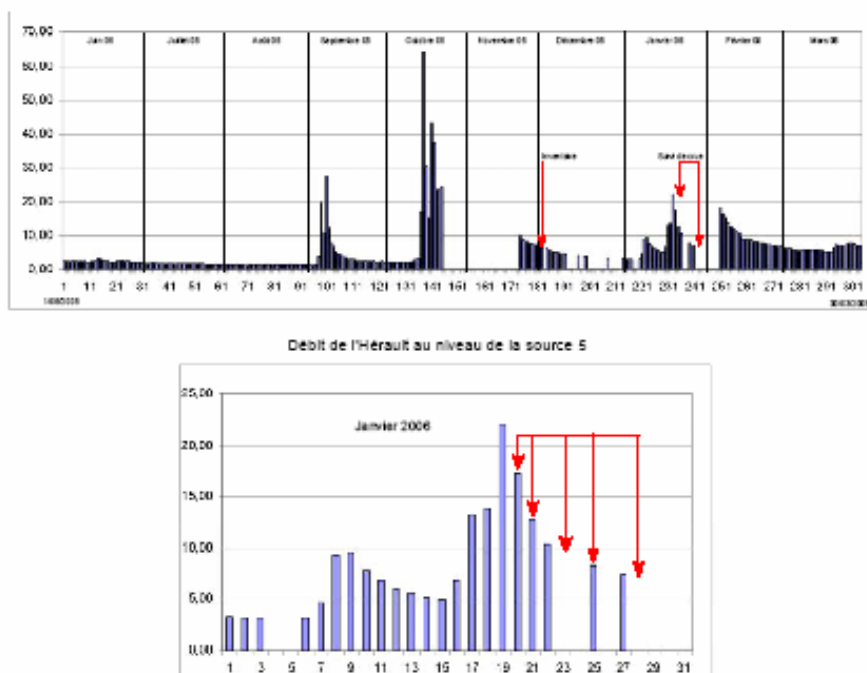
La comparaison des récoltes pré et post-pompage montre un plus grand nombre d'espèces collectées après l'expérimentation. Ce premier constat souligne l'influence forte de la saisonnalité et du débit (étiage exceptionnel) sur les inventaires, le pompage ne pouvant aucunement justifier cet enrichissement. Quatre espèces seulement, récoltées avant le pompage, n'ont pas été retrouvées lors du second inventaire: *Moitessieria* n. sp.1, *Stenasellus buili*, *Salentinella delamarei* et *Proasellus cavaticus*. Parmi celles-ci, seule *Stenasellus buili* est une forme endémique. D'autre part *Moitessieria* n. sp. 1 a été récoltée plus tard, lors du suivi de crue de janvier 2006. La forte abondance relative des crustacés *Niphargus virei* et *Faucheria faucheri*, provient des échantillonnages avec appâts (balances) dans la cavité (annexe 3).

- Suivi de crue

Le suivi de crue a respecté un délai minimum de retour à l'équilibre du massif après les pompages et les crues d'automne (Figure 5). Idéalement le meilleur moment pour collecter la faune dérivante se situe lors de la phase montante de la courbe de débit à l'exutoire, c'est-à-dire lorsque les premières eaux de «lessivage» ont traversé le massif. C'est en général à cette période que le maximum de dérive est observé (Gibert, 1986) et que l'on obtient une image plus exhaustive du contenu du massif. Il est cependant difficile d'être présent pour échantillonner au moment opportun, d'une part la survenue et le caractère significatif de la crue étant difficilement prévisibles; d'autre part le temps de réaction aux exutoires après les précipitations étant variable d'un massif à l'autre. Ainsi, sur la figure 5 on peut constater que le suivi de la crue de janvier 2006 a débuté après le maximum d'amplitude, tel que décrit par la cote piézométrique à l'exutoire et, à titre indicatif, par le débit de l'Hérault. Pour travailler en conditions optimales, le filtrage aurait dû débuter 4 jours auparavant.

Tableau 7: apports de la crue dans l'inventaire post-pompage.

Inventaire post-pompages		SOURCES & CAVITE	CRUE
MOLLUSQUES	GASTROPODA <i>Moitessieria rolandiana</i>	26	8
	<i>Moitessieria</i> n. sp. 1		
	<i>Bythinella</i> n. sp.	71	
	<i>Heraultiella exilis</i>	1	
	<i>Bythiospeum bourguignati</i>	4	9
	<i>Islamia moquiniana</i>	10	
CRUSTACÉS	<i>Kieferella delamarei</i>		131
	<i>Acanthocyclops venustus westfalicus</i>	7	326
	CYCLOPOIDA <i>Graeteriella cf. boui</i>	18	193
	HARPACTICOIDA <i>Ceuthonectes gallicus</i>	6	1
	<i>Elaphoidella leruthi</i>	23	
	<i>Nitocrella omega</i>	2	
	<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>	3	71
	<i>Fabaeformiscandona cf. breuili</i>	4	38
	OSTRACODA <i>Cryptocandona</i> sp.	5	
	<i>Pseudocandona</i> sp.	4	
	<i>Mixtacandona</i> sp.		1
	AMPHIPODA <i>Niphargus virei</i>	63	75
	<i>Niphargus laisi</i>	1	1
	<i>Niphargus pachypus</i>	2	2
	<i>Niphargus</i> (juvéniles indét.)	7	
	<i>Salentinella angelieri</i>		1
	<i>Salentinella</i> indét.	2	1
	<i>Ingolfiella thibaudi</i>	1	5
	ISOPODA <i>Faucheria faucheri</i>	53	20
	<i>Microcharon doueti</i>	9	8
abondance totale		322	891
Richesse spécifique		20	15
Richesse spécifique totale		24	



Le suivi de crue a permis de récolter 15 espèces, soit quatre de plus que lors de l'échantillonnage des sources et de la cavité. Le nombre d'espèces récoltées en période post-pompage s'élève donc à 24 sur un total de 44 espèces recensées. On a donc retrouvé seulement un peu plus de la moitié des espèces recensées. L'obtention de données quantitatives (densités de dérive) n'a pas été possible car les débits filtrés lors de la crue n'ont pas pu être enregistrés.

1.7. DISCUSSION / INTERPRETATION

1.7.1. Crue /pompage ou dérive naturelle des organismes versus dérive artificielle

-Dérive artificielle liée aux pompages

Le filtrage des eaux d'exhaure a permis d'estimer que l'aspiration d'eau par la pompe a extrait 87600 organismes stygobies du massif.

Ce résultat, est *a priori* plus faible que ce qui était attendu. Il est à mettre en relation avec la position de la pompe et la faible turbidité des eaux d'exhaure, la pompe étant située dans le point le plus bas possible du drain karstique majeur intercepté par le forage. Les organismes qui colonisent les eaux souterraines vivent en majorité au contact du sédiment, que ce soit à sa surface (espèces benthiques) ou à l'intérieur (espèces interstitielles et thigmotactiques); elles sont plus rarement planctoniques et sont donc naturellement assez rares en eau libre.

En dehors des périodes de crue, les massifs karstiques expulsent en continu et de manière naturelle de la faune stygobie. Cette dérive chronique a été mesurée par Rouch *et al.* (1968), sur le massif des Cent Fonts, pour un débit total des sources estimé 300 à 450 litres/s lors des mois de mai et juillet 1968. Tous les griffons étant pris en compte, les auteurs évaluent de 600 à 1000 individus/jour le nombre d'organismes extraits de manière naturelle du karst. Dans le cas du pompage expérimental, si l'on arrondit à 47 jours la durée des filtrages, le nombre de stygobies expulsés par la pompe serait d'environ 1900 individus par jour, soit près de deux fois plus que l'évaluation en conditions standard.

Tableau 8: Faune stygobie extraite du massif lors de la crue de Janvier 2006 (données cumulées). Comparaison avec les pompages.

espèces stygobies	pompages	crue	
<i>Moitessiera n. sp. 1</i>		8	
<i>Islamia moquiniana</i>		9	
<i>Acanthocyclops venustus westfalicus sb</i>	83	326	Copépodes
<i>Graeteriella cf. boui sb</i>	456	193	
<i>Kieferella delamarei sb</i>	14	131	
<i>Ceuthonectes gallicus sb</i>	63		
<i>Nitocrella hirta hirta sb</i>	1		
<i>Nitocrella omega sb</i>	1	1	
<i>Pseudectinosoma vandeli</i>	227		
<i>Schellencandona cf. simililampadis</i>	18	71	
<i>Fabaeformiscandona cf. breuili</i>	3		
<i>Pseudocandona sp ?</i>		38	
<i>Mixtacandona sp.</i>		1	
<i>Niphargus virei</i>	4	75	
<i>Niphargus laisi</i>		1	
<i>Niphargus</i> (juvéniles indét.)		2	
<i>Salentinella indét.</i>		1	
<i>Salentinella angelieri</i>	1	1	
<i>Ingolfiella thibaudi</i>		5	
<i>Faucheria faucheri</i>		20	
<i>Microcharon doueti</i>	2	8	
<i>Troglocaris inermis</i>	1		
<i>Clamoussella delayi</i>	2		

On sait également que l'expulsion des stygobies augmente naturellement lors des épisodes de hautes eaux. Si l'on analyse seulement le signal de sortie (dérive aux exutoires), les valeurs de densité de dérive calculées lors des pompages pourraient être comparées avec une dérive naturelle de la faune en période de crue et pourraient être assimilées à une période de perturbation hydrologique. La bibliographie offre peu de points de comparaison directe avec la faune extraite naturellement au cours des crues, les travaux de Rouch (1980, 1982) étant focalisés sur les communautés d'Harpacticides et les travaux de Gibert (1986), ne fournissant pas de détails sur les proportions de faune épigée et hypogées en condition de dérive (hors période de crue: 0.17 à 0.5 individus/m³, toutes catégories écologiques confondues). Ainsi sur une série de 30 crues suivies sur le système du Baget (Pyrénées), Rouch *et al.*, (1993) ont obtenu, pour les harpacticides, des densités de dérive variant entre 0.55 et 4.01 individus/m³, ce qui correspond sur l'ensemble de la communauté stygobie, à des valeurs variant entre 0.484 et 3.52 ind./m³. Le système subissant environ 10 à 20 crues sur un cycle annuel, plusieurs millions d'individus sont ainsi perdus chaque année.

- Référence aux expériences de pompage sur le système du Baget (Pyrénées)

Peu de données biologiques sont disponibles sur des sites de pompages en continu, qui pourraient fournir des éléments de réponse sur le devenir de la faune stygobie en zone d'extraction d'eau, hormis de rares études en milieu poreux, sur les sites de Crépieux-Charmy à Villeurbanne (inventaire, Malard & Turquin, 1996) et d'Arcine en Haute Savoie (Reygrobellet & Luczynszyn, 1993). Néanmoins ces zones sont situées dans des aquifères poreux. Leur dynamique, ainsi que la présence d'une matrice sédimentaire sont des éléments fondamentalement différents pour la dérive artificielle des organismes occasionnée par le pompage, et rendent toute comparaison réductrice.

Par contre, lors d'une expérience destinée à répondre à une question similaire sur le karst du Baget (Pyrénées), Rouch *et al.*, (1993) ont quantifié la faune extraite du massif lors de pompages et mesuré leurs effets sur le long terme. Le bassin d'alimentation de ce massif, moins étendu que celui des Cent Fonts est de 13 km² (30 km² pour les Cent Fonts). Les pompages effectués ont été de courte durée et comprennent 3 essais consécutifs représentant une durée totale de 50 heures. Les débits pompés ont varié de 220 à 230 l/s et le rabattement maximal de la nappe a été de 21.5m. Un volume total de 15300m³ a été prélevé dans la réserve karstique au cours de ces pompages, entraînant un total de 129 000 crustacés hors du massif. Les densités de dérive ont varié de 0.1 à 12.6 ind./m³. Ces pompages ont provoqué l'assèchement d'une partie du réseau, déconnecté certains drains annexes et détourné l'exhaure de l'aquifère.

Grace à une très bonne connaissance du fonctionnement écologique de ce karst (entre autres par le suivi de 30 crues) les auteurs ont mis en évidence une très forte perturbation locale des communautés de micro-crustacés sur le point de pompage (gouffre de la Peyrière). Un an après l'événement les communautés n'avaient pas atteint leur point de résilience, la perturbation étant encore facilement détectable. Cependant le peuplement du système dans sa totalité n'a pas été affecté en raison de la présence de systèmes annexes qui n'ont pas été perturbés et ont joué le rôle de réservoir de faune.

Il est difficile de comparer ces résultats aux données présentées dans ce rapport, la structure du réseau karstique, le volume mobilisable, la taille et la distribution des populations dans un système aussi complexe qu'un massif karstique ne permettant pas d'extrapolations à un autre site. Cette expérience met en évidence la nécessité d'une connaissance approfondie du fonctionnement écologique du karst sollicité. Le système du Baget a été le site expérimental de R. Rouch durant de nombreuses années.

1.7.2. Contamination par les eaux de surface

L'apparition, très tôt dans les eaux de pompage, d'éléments de la faune de surface, à la fois diversifiés et abondants, révèle de manière certaine une contamination rapide par les eaux de surface. Si cette contamination peut avoir un impact facilement maîtrisable sur la qualité de l'eau de consommation (traitement, filtrage) elle entraînera néanmoins dans le conduit karstique, hormis des organismes, des bactéries, de la matière organique et des nutriments qui seront susceptibles de modifier l'équilibre biologique de l'écosystème. Cette contamination serait, localisée, d'après l'étude hydrogéologique entre le point d'entrée des eaux de surface et le point de pompage (cf. rapport BRGM RP-54426-FR). Les effets écologiques de cette contamination ne sont néanmoins pas mesurables sur le court terme.

1.7.3. Exondation du massif

Les pompages peuvent également provoquer un autre type d'impact, non mesurable de manière directe correspondant lors du rabattement du niveau piézométrique, à l'exondation des sédiments meubles concernés par la zone d'influence du pompage. La dépression piézométrique engendrée par le pompage a été conceptualisée lors de la modélisation réalisée dans l'étude hydrogéologique. Elle est d'une extension locale plus importante autour de l'axe longitudinal du drain karstique majeur (cf. rapport BRGM RP-54426-FR). Il n'est actuellement pas possible de statuer définitivement sur la survie de la faune dans cette zone sous de telles contraintes et sur une durée aussi longue. On sait que certaines espèces comme *Niphargus virei* sont capables de construire des terriers (Ginet, 1960) dans lesquels ils s'enferment pour résister à la dessiccation, mais cet exemple est loin d'être une généralité et il n'est certainement pas applicable aux formes plus interstitielles (les genres *Microcharon*, *Pseudectinosoma*, *Proasellus*, *Ingolfiella*, *Clamoussella*...).

Si la structure du massif ménage des poches de survie qui se déconnectent puis se reconnectent au réseau principal lors de la remise en charge du massif, comme dans le cas du Baget, il devrait y avoir une recolonisation ultérieure. Dans le cas contraire les populations du massif courent un risque de disparition. Les prélèvements post-pompage fournissent quelques éléments de réflexion, mais seuls des suivis de crue à long terme pourraient apporter une réponse définitive à ce second aspect du problème.

1.8. RECOMMANDATIONS, PERSPECTIVES

Les essais de pompage ont provoqué une émission d'organismes qui correspondrait au double de celle observée hors crue dans la littérature (Rouch *et al.*, 1968). L'examen exhaustif du double échantillonnage permettrait d'évaluer la variabilité de ces résultats. L'inventaire a permis de récolter plus d'organismes en conditions post-pompage que pré-pompage, ce qui semble indiquer qu'il n'y aurait pas d'impact notable sur les communautés stygobies. Mais les conditions hydrologiques n'étaient pas comparables et le cumul des espèces récoltées lors de l'inventaire post-pompage n'atteint que 56% des espèces potentiellement présentes. Ce résultat souligne donc aussi le fait que la connaissance du fonctionnement biologique d'un écosystème karstique, permettant raisonnablement d'en prévoir le comportement en conditions de stress, nécessite un échantillonnage en plus grande adéquation avec les conditions hydrologiques, donc plus important que celui qui a été réalisé dans le protocole de suivi des pompages (notamment l'échantillonnage des crues). Les données fournies dans ce rapport ont une valeur ponctuelle d'expertise et n'ont pas une assise statistique suffisante pour conclure de manière certaine à un effet négligeable.

Un grand nombre d'inconnues réside encore dans le protocole d'exploitation de la ressource en eau.

Les effets de l'abaissement durable du niveau piézométrique sur les communautés stygobies n'ont pas pu être mesurés. Il n'est actuellement pas possible d'appréhender cet

impact sur la base des données collectées au cours de ce suivi; de même qu'il n'est pas envisageable de planifier une évaluation directe de cet effet lors d'éventuels pompages ultérieurs et surtout d'en prévoir les conséquences en conditions d'exploitation. Toutefois une évaluation indirecte est possible. Si l'impact est négligeable le massif devrait continuer à expulser une faune riche et diversifiée lors des épisodes naturels de crues. Dans le cas inverse on devrait constater la disparition des éléments les plus sensibles.

Même si l'extraction d'eau et de faune par l'intermédiaire d'une pompe peut, au premier abord, s'apparenter à un processus naturel de dérive faunistique lors d'une crue, il s'agit en fait de deux mécanismes opposés. Une crue naturelle provoque un phénomène de chasse et une expulsion parfois massive d'organismes résultant d'une **remontée conséquente du niveau piézométrique** (Rouch, 1970; Gibert *et al.*, 1982, 1984) et d'un «lessivage» de l'épikarst et de la zone non saturée. Une crue évacue un volume d'eau conséquent pendant un court laps de temps provoquant une augmentation importante de la vitesse d'écoulement au niveau des drains. Les résultats bibliographiques montrent que les communautés dans leur ensemble persistent grâce à la présence dans certaines parties du massif, de refuges (systèmes annexes) à partir desquels les populations se reconstituent. Turquin (1981) a montré que les crues avaient aussi un rôle positif de redistribution des juvéniles dans le massif..

Lors d'un pompage intense et continu, l'extraction directe d'organismes constitue un impact qui peut rester surmontable si sa durée n'est pas excessive. C'est ce qui a été observé lors de pompages d'essais dans le karst du Baget (Rouch *et al.*, 1993). La mesure de l'impact écologique d'un pompage de longue durée dans son ensemble (extraction d'organismes, intrusion d'eau de surface, exondation d'une partie du massif) nécessite la mise en œuvre d'un suivi spécifique, aucune référence à ce sujet n'existant dans la littérature spécialisée.

La distinction majeure entre un pompage de longue durée et un phénomène de crue est l'**abaissement durable du niveau piézométrique** qui provoque l'exondation d'une partie du massif. Dans le cas du système karstique des Cent Fonts, l'abaissement du niveau piézométrique se situe à proximité du drain principal et peut avoir comme conséquence une destruction temporaire et une réduction importante de la surface et du volume des habitats nécessaires au développement normal des organismes. Ce phénomène revêt une importance particulière dans ce type d'écosystème en raison des caractéristiques originales des communautés stygobies résumées ci-après:

- faible densité,
- cycles de développement longs,
- capacités de dispersion réduites,
- taux d'endémisme élevé.

Des suivis de crue à long terme permettraient de savoir si la structure du karst a ménagé des refuges suffisamment efficaces pour assurer la résilience des communautés et le maintien des espèces rares et endémiques qui font la richesse exceptionnelle de ce massif.

1.9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bensettiti F., Herard-Logereau K. 2004. Cahiers d'Habitats tome V : Habitats rocheux. Paris, 381 pp.

- Botosaneanu L. 1998. Sources: aux portes du Styx. Studies in crenobiology. Pages 229-250 In The biology of springs and springbrooks, Botosaneanu L. Ed. Leiden, Backhuys publishers
- Bou C., Rouch R. 1967. Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 265, 369-370.
- Bouchet P. 1990. - La malacofaune française: Endémisme, Patrimoine naturel et Protection. Revue d'Ecologie (la Terre et la Vie) 45: 259-288.
- Coineau N. 1998. Syncarida. Pages, 863-876 in Juberthie C. & V. Decu (Eds) "Encyclopaedia Biospeologica Tome 2"
- Creuzé des Châtelliers M, Turquin M-J., Gibert J. 1991. Les aquifères: des systèmes biologiques. Hydrogéologie 3, 163-185.
- Culver D.C., Sket B. 2000. Hotspots of subterranean biodiversity in caves and wells. Journal of Cave and Karst Studies 62, 11-17.
- Danielopol D.L., Pospisil P. 2001. Hidden biodiversity in the groundwater of the Danube floodplain National Park (Austria). Biodiversity and Conservation 10, 1711-1721.
- Danielopol D.L., Gibert J., Griebler C., Gunatilaka A., Hahn H.J., Messana J., Notenboom J., Sket B. 2004. Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy. Environmental Conservation 31/3, 185-189.
- Dole-Olivier M-J., Marmonier P. 1992. Patch distribution of interstitial communities: prevailing factors. Freshwater Biology 27, 177-191.
- Dole-Olivier M-J., Marmonier P. 1992. Effects of spates on interstitial assemblages structure. Disturbance-perturbation relationship, rate of recovery. Hydrobiologia 230, 49-61.
- Dole-Olivier M-J, Malard F., Ferreira D. & Gibert J. 2005. Biodiversité dans les eaux souterraines- Groundwater Biodiversity. La Houille Blanche n°3-2005, 39-44.
- Falkner G., Ripken T.E.J. & Falkner M. 2002.- Mollusques continentaux de France. Liste de référence annotée et bibliographie. IEGB-SPN/MNHN, Paris, 350 pp.
- Ferreira D. 2005. Biodiversité aquatique souterraine de France: base de données, patrons de distribution et implications en termes de conservation. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, 441p.
- Ferreira D. Malard F., Dole-Olivier M-J., Gibert J. Obligate groundwater fauna of France: diversity patterns and conservation implications. Biodiversity and Conservation, sous presse.
- Gibert J. 1986. Ecologie d'un système karstique jurassien. Hydrogéologie, dérive animale, transit de matières, dynamique de la population de Niphargus (Crustacé - Amphipode). Mémoires de Biospéologie XIII, 1-379.
- Gibert J. 2001. Protocols for the ASsessment and Conservation of Aquatic Life In the Subsurface (PASCALIS): a European project. Proceedings of "Mapping Subterranean Biodiversity". Special Publication, Karst Water Institute & Laboratoire souterrain de Moulis, 19-21.
- Gibert J., Laurent R. 1982. L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Ain, France). IV - La dérive d'invertébrés hypogés aquatiques au niveau de l'exutoire principal du massif. Pol. Arch. Hydrobiol., 29, 2, 471-483

- Gibert J., Laurent R., Müller I. 1984. L'écosystème karstique du massif de Dorvan (Torcieu, Dpt. Ain, France). VI - Analyse hydrochimique et hydrobiologique d'une crue de printemps au niveau de l'exutoire principal. Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, 5, 71-90.
- Gibert J., Stanford J.A. Dole-Olivier M-J., Ward J.V. 1994. Basic Attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. Groundwater Ecology (Eds J. Gibert, D.L. Danielopol & J.A. Stanford), pp. 7-40.
- Gibert J., Deharveng L. 2002. Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. BioScience 52/6, 473-481.
- Ginet R. 1960. Ecologie, éthologie et biologie de Niphargus Annales de spéléologie 15/1-2, 254p.
- Ginet R., Decou V. 1977. Initiation à la biologie et à l'écologie souterraines. Delarge, Paris, 345p.
- Guillemin C., Roux J-C, Gibert J., Leynaud G., Lorgues G., de Marsily G., Margat J., Ollagnon H., Point P., Rémy J-C., Retkowsky Y., Valiron F. & J. Vial - 1991 - Pollution des eaux souterraines en France. Sous la direction de C. Guillemin & J-C. Roux. Ed du BRGM, Manuel et Méthodes n°23, 262 p.
- Juberthie C. 1995. Underground habitats and their protection. Nature and Environment, 72. Council of Europe Press, Strasbourg, 160p.
- Juberthie-Jupeau L. 1974. Les caractères liés à l'incubation chez Troglodaris anophthalmus et Troglodaris inermis Crustacés décapodes hypogés. Annales de Spéléologie, 29, 167-171.
- Juberthie-Jupeau L. 1975. La ponte d'un crustacé Décapode souterrain : cycle saisonnier et influence biologique. Annales de Spéléologie, 30, 167-171.
- Malard F., Turquin M-J. 1996. Inventaire de la faune aquatique souterraine du champ captant de Crépieux Charny. Campagnes de prélèvements du mois d'août 1994. Rapport interne, 26p.
- Malard F., Gibert J., Laurent R. 1997. L'aquifère de la source du Lez: un réservoir d'eau... et de biodiversité. Karstologia 30, 49-54.
- Marmonier P., Dole M-J. 1986. Les Amphipodes des sédiments d'un bras court-circuité du Rhône: logique de répartition et réaction aux crues. Sciences de l'eau 5, 461-486.
- Reygrobellet J-L, Luczyszyn H. 1993. Investigations hydrobiologiques sur la nappe (Forage F3) alimentant la station de pompage d'Arcine (AEP du syndicat) et sur le ruisseau d'Arcine. Domaine Hydrogéologique Agence de l'Eau RMCn°542, 34p.
- Rouch R. 1970. Le système karstique du Baget. I Le phénomène d'«hémorragie» au niveau de l'exutoire principal. Annales de Spéléologie, 25, 665-709.
- Rouch R. 1977. Considérations sur l'écosystème karstique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 284, 1101-1103.
- Rouch R. 1980. Le système karstique du Baget. X. La communauté des Harpacticides. Richesse spécifique, diversité et structures d'abondances de la nomocénose hypogée. Annales de Limnologie, 16, 1-20.
- Rouch R. 1982. Le système karstique du Baget. XII. La communauté des Harpacticides. Sur l'interdépendance des nomocénoses épigée et hypogée. Annales de Limnologie, 18, 41-54.

- Rouch R., Juberthie-Jupeau L., Juberthie C 1968. Recherches sur les eaux souterraines - 3
– Essai d'étude du peuplement de la zone noyée d'un karst. Annales de spéléologie,
23/4, 717-733.
- Rouch R. Pitzalis A., Descouens A. 1993. Effets d'un pompage à gros débit sur le
peuplement des Crustacés d'un aquifère karstique. Annales de Limnologie 9/1, 15-29.
- Sinton L.W. 1984. The macroinvertebrates in a sewage-polluted aquifer. Hydrobiologia 119,
161-169.
- TERCIA, Acer campestre. 2001. Etude d'impact du projet de forage des Cents Fonts.
- Turquin M-J. 1981. The tactics of dispersal of two species of Niphargus (perennial,
Troglobitic Amphipoda); Proceedings 8th International Congress of speleology,
Bowling-Green (USA), B.F. Beck Ed., 353-354.
- Vigneux E., Keith P., Noël P. 1993. Atlas préliminaire des crustacés Décapodes d'eau
douce de France. Publication MNHN, Paris, 56p.

Annexe 2

Especies présentes dans les aquifères de Sauve, du Lez et des Cent Fonts. Dénombrement des espèces présentes dans trois, deux et un seul aquifère									
seul aquifère									
3 aquifères									
2 aquifères									
1 seul aquifère									
total									

Annexe 4

Inventaire général des stygobiontes du karst des Cent Fonts.		
Ensemble des données disponibles		
Groupe	genre / espèce	nom d'auteur
HIRUDINEA	Trocheta bykowskii Gedroy, 1913	
GASTROPODA	Bythinella n. sp. à décrire Paladilh, 1866 Heraulthella exilis Paladilh, 1867 Islamia moquiniana Dupuy, 1851 Moitessieria rolandiana Bourguignat, 1863 Moitessieria simoniana* Saint Simon (1848) Moitessieria n.sp. 1 à décrire Moitessieria n.sp. 2 à décrire Paladilhia pleurotoma Bourguignat 1865	
DECAPODA	Troglacaris inermis Fage, 1937	
ISOPODA	Stenasellus bulli Remy, 1949 Proasellus cavaticus Leydig, 1871 Coinneau, 1968 Dollfus & Viré, 1900 Dollfus, 1897 Sphaeromides raymondi	
AMPHIPODA	Niphargus laisi Schellenberg, 1936 Niphargus gallicus Schellenberg 1935 Bate 1859 Niphargus kochianus kochianus Niphargus pachypus Schellenberg 1933 Chevreux, 1896 Ruffo & Delamare-Deboutteville, 1952 Coinneau, 1962 Salentinella sp. Ingolfiella thibaudi Coinneau, 1968	
OSTRACODA	Fabaeformiscandona cf. breullii Paris, 1920 Schellencandona cf. simililampadis Danielopol, 1978 Cryptocandona sp. Pseudocandona zschokkei Wolf (1920) Pseudocandona sp. Candoninae "triangulaire" Sphaeromicola cebennica juberthiei Danielopol, 1977	
SYNCARIDA	Clamoussella cf. delayi Serban, Coinneau & Delamare, 1971	
CYCLOPOIDA	Acanthocyclops rhenanus Kiefer, 1936 Acanthocyclops venustus westfalicus (Kiefer, 1931) Lescher-Moutoué, 1969 Graeterella (Paragraeterella) vandeli Graeterella (Graeterella) unisetigera Graeterella (Graeterella) cf. boui Kieferella delamarei Speocyclops racovitzai Chappuis, 1923	
HARPACTICOIDA	Pseudectinosoma vandeli Rouch, 1969 Ceuthonectes gallicus Chappuis, 1928 Elaphoidella leruthi meridionalis Chappuis, 1953 Hertzog, 1936 Nitocrella hirta Chappuis, 1923	
NOMBRE TOTAL D'ESPACES		
44		

*identification soumise à caution: correspondrait en fait à Moitessieria n.sp. 1



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service EAU, Unité RMD
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 90